



**Universidad
de Holguín**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DE TALUDES A
TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA QUAKE/W DEL SOFTWARE
GEOSTUDIO 2012**

Autor: Rodolfo Alejandro Zorrilla Montaner

HOLGUÍN 2021





**Universidad
de Holguín**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL
TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DE TALUDES A
TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA QUAKE/W DEL SOFTWARE
GEOSTUDIO 2012**

Autor: Rodolfo Alejandro Zorrilla Montaner

Tutor: MSc Yanet Vázquez Ballester,PA

HOLGUÍN 2021



PENSAMIENTO

El ingeniero ideal es un compuesto...No es un científico, no es un matemático, no es un sociólogo o un escritor; pero puede usar el conocimiento y las técnicas de cualquiera o todas estas disciplinas para resolver problemas de ingeniería.

Nathan Washington

DEDICATORIA

A mi mamá, mi abuela y mi papá por su amor incondicional y dedicación infinita en todos los momentos de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios, a toda mi familia que siempre me ha guiado los pasos para convertirme en mejor persona y son mi inspiración para seguir superándome, en especial a mi mamá y abuela que son mis pilares fundamentales en la vida, a mi padre, mi hermano, mi padrastro, mis tíos y mi novia por brindarme su amor y comprensión en esta etapa de mi vida.

A mi tutora la MSc.Ing Yanet Vázquez Ballester que me apoyó desde el comienzo de la investigación, por dedicarme parte de su tiempo con cariño y respeto.

A todos aquellos que de alguna manera me ayudaron y apoyaron para que esta tesis se hiciera realidad en especial al DrC. Jorge Gonzáles Ramírez.

A todos los profesores que de una forma u otra han jugado un papel fundamental en mi formación como profesional.

A mis amigos por todo su apoyo.

RESUMEN

La construcción de presas de relave (colas), tienen como objetivo, almacenar los residuos sólidos del proceso minero-metalúrgico. Los movimientos catastróficos ocurridos por rotura de presas de relaves mineros componen un alto riesgo (peligrosidad, exposición, vulnerabilidad) para la minería, el ambiente, la construcción y todo lo que a su paso encuentre en su movimiento este material. En la actualidad, la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas UIC Holguín (ENIA) realiza el análisis de estabilidad de taludes estático y pseudoestático a través de software Geostudio2007 de manera empírica, y no cuentan con un procedimiento para realizar el análisis dinámico a través de la herramienta Quake del software GeoStudio 2012. Por lo que en el presente trabajo se propone elaborar un procedimiento para el análisis de dinámico de taludes a través la herramienta Quake del software GeoStudio 2012 constituyendo un aporte importante desde el punto de vista teórico y práctico. Para ello se tiene en cuenta tres tipos de análisis, análisis de filtración con la herramienta Seep/W, el estático a través de la herramienta Slope/W, y el análisis dinámico mediante la herramienta Quake/W que tiene en cuenta la inclusión de parámetros dinámicos y acelerogramas. Se aplica el procedimiento al caso de estudio presa de cola Yagrumaje en el análisis dinámico de los taludes, lo que permitió realizar un mejor análisis de la estabilidad y posibilitó la validación de la hipótesis de la investigación. La solución del problema de la investigación y el cumplimiento de los objetivos fue posible con la implementación de un sistema de métodos de la investigación de naturaleza teórica y empírica. La redacción de la tesis está regida por la norma APA.

ABSTRACT

The objective of the construction of tailings dams (tails) is to store the solid waste from the mining-metallurgical process. The catastrophic movements caused by the rupture of mining tailings dams, constitute a high risk (danger, exposure, vulnerability) for mining, the environment, construction and everything that this material encounters in its movement. Nowadays, entities such as the National Applied Research Company UIC Holguín (ENIA) perform the stability analysis of static and pseudo-static slopes through Geostudio 2007 software empirically, and there is no knowledge of the use of a procedure to perform the dynamics analysis through the Quake tool of the GeoStudio 2012 software. Therefore, in this paper it is proposed to develop a procedure for the analysis of slope dynamics through the Quake tool of the GeoStudio 2012 software, which constitutes an important contribution from the point of view theoretical and practical. For this, three types of analysis are taken into account, the filtration analysis with the Seep/W, the static through the Slope/W tool and the dynamic analysis through the Quake/W tool that takes into account the inclusion of dynamic parameters and accelerograms. The procedure is applied in to Yagrumaje tail dam like study case, which allowed a better stability analysis to be carried out by including accelerograms and dynamic parameters and made it possible to validate the research hypothesis. The solution of the research problem and the fulfillment of the objectives were possible with the implementation of a system of research methods of a theoretical and empirical nature. The writing of thesis is governed by the APA standard.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. SISTEMATIZACIÓN DE LOS FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS QUE SUSTENTAN EL ANÁLISIS DINÁMICO DE TALUDES DE PRESAS DE COLAS CON EL USO DEL SOFTWARE GEOSTUDIO 2012.....	6
Introducción al capítulo.....	6
1.1 Generalidades sobre los taludes en las presas de cola y los factores que inciden en su estabilidad dinámica	6
1.1.1 Factores que inciden en la estabilidad dinámica de las presas de cola7	
1.2 Métodos fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes	9
1.3 Análisis del factor de seguridad en la estabilidad de taludes.....	13
1.4 Software GeoStudio 2012.....	15
1.4.1 Herramienta Slope/W. Análisis estático	16
1.4.2 Herramienta Seep/W. Análisis de filtración del suelo	17
1.4.3 Herramienta Quake/W. Análisis dinámico	17
Conclusiones parciales del capítulo	19
CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DE TALUDES A TRAVÉS DEL SOFTWARE GEOSTUDIO 2012. CASO DE ESTUDIO PRESA DE COLA YAGRUMAJE, MOA, HOLGUÍN	20
Introducción al capítulo.....	20
2.1 Diseño del procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través el software GeoStudio 2012	20
2.2 Aplicación del procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través del software GeoStudio 2012 en la presa de cola Yagrumaje, del municipio Moa, provincia Holguín.....	23

Conclusiones del capítulo.....	57
CONCLUSIONES GENERALES	58
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	63

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la ciencia y la tecnología es cada vez más un factor que impacta en el avance de las sociedades, particularmente en la economía. Para un país subdesarrollado como Cuba, la explotación de sus recursos naturales es un elemento vital para lograr el crecimiento económico requerido. En la provincia de Holguín, en el municipio de Moa, se ubican las presas de relaves mineros donde por más de 50 años la explotación minera ha sido parte de la economía fundamental desarrollada en el territorio. La actividad minera hizo necesario llevar a cabo la construcción de presas de relave (colas), las cuales tienen como objetivo, almacenar los residuos sólidos del proceso minero-metalúrgico.

Las presas de cola, poseen similitud a las presas de agua pues su objetivo principal es almacenar, y la diferencia más importante es que se construyen progresivamente a lo largo de todo el período de explotación minera. Deben crecer gradualmente en altura, con los mismos residuos o con otro material de préstamo, al ritmo de producción de residuos de la mina. Según Hernández (2015), las colas son sedimentos friables, sueltos, de granulometría pequeña y fina, fuertemente limosas, saturadas por las aguas, con alta capacidad de fluidez. Este líquido posee un 30% de sólidos y un 70% de agua, que lleva consigo desechos de amoníaco, ácido sulfúrico y otros productos químicos, los cuales deben ser depositados o manejados de forma correcta con el objetivo de no afectar el medio ambiente.

Los movimientos catastróficos ocurridos por rotura de presas de relaves mineros componen un alto riesgo (peligrosidad, exposición, vulnerabilidad) para la minería, el ambiente, la construcción y todo lo que a su paso encuentre en su movimiento este material. El grado de los daños producidos sobre la presa, dependerá tanto de la aceleración máxima del movimiento sísmico y de las condiciones geotécnicas del depósito al momento de ocurrido el evento.

En el municipio de Moa, de la provincia de Holguín se encuentran enclavadas las presas de cola, las cuales son propensas a la ocurrencia de sismos debido a su cercanía a las zonas sísmicas generadoras Oriente, Cauto – Nipe, Sabana o Norte Cubana y Norte de la Española. Estudios realizados por especialistas del CENAIIS, (Chuy, 1999),

(Noas, Vega, Ríos, Chuy, 2016), (Colectivo de autores, 2016) fundamentan que las mayores percepciones sismológicas en la región se registran a partir de 1992 hasta 1998 ocurriendo sismos de magnitudes entre 3.2, 4.5, 5.6 en la escala de Richter.

Autores como Rodríguez (2002); Noas y Chuy (2005) y Hernández (2015) hacen referencia a tres sismos registrados en Moa en los años 1995, 1996 y 1998 de intensidad de 4 y 5.3 grados, que provocaron grietas en la balsa de residuo inactiva construida por la empresa Comandante Pedro Soto Alba (anexo, foto 1). Y justifican que una de las causas asociadas al fallo o rotura de la presa de residuo es la pérdida de estabilidad, por lo que puede traer consigo la contaminación ambiental y afectación socioeconómica. Siendo el análisis de estabilidad de las presas de cola del territorio un factor fundamental, lo cual revela con mayor fuerza la necesidad del análisis de estabilidad de los taludes de las presas de cola ante acciones dinámicas.

Diferentes autores han tratado el análisis de estabilidad de taludes como Leyva (2014), que establece un manual para el análisis estático de taludes naturales. Pupo (2016) efectúan un análisis estático de presas de colas y Espronceda (2016) un análisis tenso-deformacional. En estas investigaciones solo se realiza análisis estático de taludes y no se contemplan la acción de los sismos.

Debido al aumento de las percepciones sismológicas en la región de Moa, Vázquez (2017), realiza el análisis de los factores de seguridad ante acciones dinámicas en taludes de presas de cola a través del método pseudoestático, con la influencia de una carga sísmica horizontal. Luego Peña (2018), realiza un análisis de estabilidad de taludes en carretera a través del método pseudoestático y del Río (2019) de un talud natural. Estas investigaciones se ejecutaron a través del software GeoStudio 2007 con la herramienta SLOPE/W, y no emplearon la inclusión de acelerogramas.

En la actualidad, la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas UIC Holguín (ENIA) realiza el análisis de estabilidad de taludes estático y pseudoestático a través de software Geostudio2007 con la herramienta Slope/W de manera empírica, y no cuentan con un procedimiento para realizar el análisis dinámico a través de la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012.

Teniendo en cuenta las limitaciones expuestas, se formula el siguiente **problema de investigación**: ¿Cómo realizar un procedimiento que incluya el análisis dinámico de taludes a través la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012? Siendo el **objeto de la investigación**: taludes. Inmerso en el **campo de acción**: análisis dinámico de taludes.

El objetivo general que orientará el proceso investigativo está en función de: elaborar un procedimiento para el análisis de dinámico de taludes a través la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012.

La **hipótesis** se sustenta en que, la elaboración de un procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través de la inclusión de acelerogramas y parámetros dinámicos, favorecerá el uso de la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012 en la obtención de resultados más precisos y la predicción de la inestabilidad de presas de cola.

Objetivos específicos:

1. Sistematizar los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan el análisis dinámico de taludes de presas de colas.
2. Realizar un estudio detallado de las características y particularidades de la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012.
3. Aplicar el procedimiento propuesto para el análisis dinámico de los taludes en el caso de estudio presa de cola Yagrumaje.

Para el desarrollo del proceso investigativo se emplearon los siguientes **métodos** de investigación:

Métodos teóricos:

- Histórico-lógico: se utiliza para la revisión, análisis de los documentos, se definen los principales antecedentes y fundamentos del comportamiento de las presas de relave minero del municipio de Moa bajo condiciones sísmicas.
- Análisis y síntesis: Se usa para revelar la actualidad del problema que se investiga, analizar los datos existentes e informaciones relacionadas con la temática. Se consulta y analiza la información disponible en Internet, con la visita de sitios WEB más importantes de instituciones productivas, de investigación y universidades.

- Hipotético-deductivo: Se emplea para proponer la hipótesis inicial a partir de la experiencia acumulada en el tema, así como para deducir los resultados esperados y verificar su nivel de cumplimiento.

Métodos empíricos:

- Revisión bibliográfica y análisis documental: para la precisión de todos los referentes teóricos, ya sea provenientes de la literatura o de fuentes oficiales como fueron artículos científicos recientes, normas cubanas vigentes, e informes oficiales a diferentes instancias.

El **aporte** radica en un procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012, el que será empleado por los especialistas de la UIC ENIA Holguín y como material docente para la asignatura Geotecnia en la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad de Holguín.

La **novedad** consiste en que el procedimiento incluye la herramienta Quake/W, el uso de acelerogramas y parámetros dinámicos que intervienen en la precisión de los resultados y en el factor de seguridad.

El presente trabajo se enmarca dentro de las líneas de investigación del Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín. Tributa a las siguientes áreas de conocimiento: Modelación, diseño y evaluación de obras de ingeniería, Geomática aplicada a la ingeniería y estudios de vulnerabilidad ante el impacto de las consecuencias del cambio climático en las construcciones. También da respuesta a objetivos planteados en el proyecto: Geotecnia sísmica aplicada a los riesgos sísmicos en la ciudad de Holguín, considerando la interacción suelo-estructura.

El informe que se presenta tiene la siguiente estructura: resumen, introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

En el Capítulo 1 se realiza una sistematización teórica derivada del análisis histórico, teórico, metodológico, conceptual y contextual relacionada con el objeto y campo de investigación. Parte esencial de la búsqueda se concentró la búsqueda bibliográfica que permitiera una actualización efectiva de los métodos utilizados mundialmente para el análisis de estabilidad dinámica de los taludes de las presas de cola, así como la

inserción de acelerogramas y parámetros dinámicos para acometer la obtención del factor de seguridad en este tipo de obra.

El Capítulo 2 ofrece un procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través del Software GeoStudio 2012 y la inclusión de acelerogramas y parámetros dinámicos. Se aplica el procedimiento para determinar la estabilidad de los taludes de la presa de cola Yagrumaje como caso de estudio para el método de construcción línea central ante condiciones estáticas y dinámicas que permitan dar respuestas de los factores de seguridad.

CAPÍTULO 1. SISTEMATIZACIÓN DE LOS FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS QUE SUSTENTAN EL ANÁLISIS DINÁMICO DE TALUDES DE PRESAS DE COLAS CON EL USO DEL SOFTWARE GEOSTUDIO 2012

Introducción al capítulo

En este capítulo se abordan las generalidades sobre los taludes de las presas de cola y los factores que inciden en su estabilidad dinámica, así como los métodos fundamentales para realizar el análisis. Se analizan los valores de factor de seguridad a comparar cuando el análisis es estático o dinámico. Se hace referencia al software GeoStudio 2012 y a sus herramientas haciendo énfasis en Slope/W para el análisis de estabilidad estático, Seep/W para el análisis de filtración y Quake/W para el análisis dinámico, con la inserción de acelerogramas y parámetros dinámicos.

1.1 Generalidades sobre los taludes en las presas de cola y los factores que inciden en su estabilidad dinámica

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación, tales como canales, caminos y ferrocarriles, así como el impulso de la construcción de presas de tierra, y el desenvolvimiento de obras de protección contra la acción de ríos han puesto al diseño y construcción de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden. Como plantea Álvaro (2003), tanto por el aspecto de inversión, como por las consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista. Y entiende por talud cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra y constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable.

Leyva (2014) manifiesta como talud al término que se utiliza para designar a la acumulación de fragmentos de roca partida en la base de paredes de roca, acantilados de montañas, o cuencas de valles. Estos depósitos típicamente poseen una forma cóncava hacia arriba, mientras que la máxima inclinación de tales depósitos corresponde al ángulo de reposo correspondiente al tamaño promedio de las rocas

que lo componen. Estos se construyen con la pendiente más elevada que permite la resistencia del terreno, manteniendo unas condiciones aceptables de estabilidad.

Es por ello que, la estabilidad de taludes es la teoría que estudia la estabilidad o posible inestabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería civil.

1.1.1 Factores que inciden en la estabilidad dinámica de las presas de cola

Botero, Flores-Berrones, Romo y Méndez (2011) establecen que, para asegurar la estabilidad de una presa de cola, se deben tener en cuenta una serie de factores, por ejemplo: la geología y sismicidad de la región, la geometría del terraplén, la presencia de agua en los taludes, las propiedades mecánicas de los materiales del terraplén y la cimentación, el nivel de embalse y los métodos de construcción.

- Geología y Sismicidad de la región.

El origen y tipo de suelo, la presencia de fallas geológicas activas o que han estado recientemente activas en la zona pueden ser determinantes del comportamiento de la presa al momento que actúan en ella las fuerzas sísmicas y gravitacionales. La intensidad, magnitud y el período de recurrencia de los sismos en la zona donde se ubica la cortina de la presa, junto con el origen y mecanismos de falla de dichos sismos, influyen directamente en las características de las fuerzas sísmicas que actúan sobre las laderas que forman una cortina y los taludes aledaños (Botero et al., 2011).

- Geometría del terraplén.

La longitud, altura y pendiente de los taludes, anchos de corona y base, son factores que influyen de manera significativa en el comportamiento estático y en la respuesta sísmica de los taludes debido a la generación de efectos que pueden modificar el estado de esfuerzos y deformaciones. (Botero et al., 2011).

La inclinación de los taludes está en función de la altura de la presa, propiedades mecánicas del cimiento y del cuerpo de la presa y de las fuerzas que actúan en los taludes (Ortiz y Portilla, 2014).

- Presencia de agua en los taludes.

La estabilidad de un talud depende fundamentalmente de la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales que lo integran y a la magnitud de los esfuerzos efectivos. Además de la presión hidrostática, se generarán presiones de poro adicionales debidas a la acción sísmica, lo que puede originar que la resistencia al corte disminuya bruscamente al momento en que se incrementan los esfuerzos dinámicos producidos por el sismo. La presencia de agua en un talud puede producir fuerzas adicionales de filtración cuando la cortina está bajo un régimen de flujo establecido.

Esta presencia de agua también influye en los empujes hidrostáticos e hidrodinámicos que deben tomarse en cuenta en el análisis de estabilidad de los taludes de una presa. (Botero et al., 2011)

- Propiedades mecánicas de los materiales del terraplén y la cimentación.

Las características de permeabilidad, resistencia al corte y compresibilidad de estos materiales tienen especial importancia al momento de la ocurrencia de un sismo. En el caso de un terraplén, tales características dependen en gran parte de la manera en que fue realizado el proceso de compactación, especialmente en el control del contenido de agua, los espesores de capa, la energía aplicada y la realización de terraplenes de prueba previos a la construcción para la determinación de dichos parámetros. En el caso de la cimentación, se puede presentar el fenómeno de licuación si se tiene la presencia de uno o más estratos de arena suelta. (Botero et al., 2011)

Es importante tomar en cuenta que estas propiedades de los suelos o rocas, que constituyen el terraplén o su cimentación, pueden cambiar con el tiempo, principalmente por la presencia de agua, intemperismo y cambios físico-químicos de los materiales (Mitchell, 2004).

- Nivel del embalse.

La situación más crítica en la estabilidad de un talud de un terraplén, por la ocurrencia de un sismo se podría presentar cuando el embalse está en su máxima capacidad, ya que es la condición que induce mayores esfuerzos cortantes debido al empuje hidrostático, los cuales se superponen a los inducidos por la acción del sismo; además,

puede ocasionar mayores presiones de poro, que disminuye la resistencia de los materiales. (Botero et al., 2011)

El borde libre de la presa debe ser siempre superior a la mínima altura que garantice que lluvias excepcionales que ingresen al depósito de relaves no alcancen niveles que sobrepasen el nivel de la cresta del dique, evitando desborde de la laguna, con la consiguiente erosión del dique. (Lara, 1999)

- Métodos fundamentales de construcción de presas de cola.

Para construir los taludes de una presa de cola, se pueden emplear varios métodos. La diferencia entre un talud de una presa de cola y una presa para retener agua, es que el talud de una presa de cola es construido por un proceso continuo y depende de la velocidad de producción de la mina. Puede ser construido a partir del método seleccionado y del material disponible: residuos sólidos de mina, material de préstamo, colas colocadas hidráulicamente o colas cicloneadas.

Diversos autores como (Cancela, 1987), (Actis, 2000), (Venegas, 2011) y documentos normativos como (Guía Ambiental de Presas de Colas en Bolivia, 2001) (ICOLD, 97) hacen referencia a los tres métodos principales de construcción de presas de cola: método aguas arriba, aguas abajo y línea central. En los tres métodos es común agregar o combinar otros materiales con los desechos a fin de lograr una estructura más estable, pero deben ser compatibles para evitar diferencias de asentamiento, de compactación y de permeabilidad, lo cual puede tender a hacer variar las condiciones de estabilidad.

Todos los factores que influyen en la estabilidad dinámica de presas de colas son importantes pero la geología y sismicidad de la región, las propiedades mecánicas de los materiales del terraplén y la cimentación, así como el método de construcción son elementos a tener en cuenta para determinar la estabilidad de la estructura.

1.2 Métodos fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que interviene las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que

actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en:

- Métodos determinísticos: conocidas o supuestas las condiciones en que se encuentra un talud, estos métodos indican si el talud es o no estable. Consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para, a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud. Existen dos grupos: métodos de equilibrio límite y métodos tenso-deformaciones.

- Métodos probabilísticos: consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como variables aleatorias para el análisis, realizándose a partir de ellas los cálculos del factor de seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del factor de seguridad, y curva de estabilidad del talud, con el factor de seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.

La elección del método de análisis más adecuado en cada caso dependerá de:

- Las características geológicas y geomecánicas de los materiales (suelos o macizos-rocosos).
- Los datos disponibles del talud y su entorno (geométricos, geológicos, geomecánicos, hidrogeológicos, etc.)
- Alcance y objetivos del estudio, grado de detalle y resultados que se espera obtener.

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos, como se muestra en la figura 1.1:

- Métodos de cálculo tenso-deformacional: consideran en el cálculo las deformaciones del terreno además de las leyes de la estática. Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse aplicando el método de los elementos finitos u otros métodos numéricos. El método de los elementos finitos esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos, utiliza la formulación de desplazamientos y presenta los resultados en forma de esfuerzos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente. Su utilización es muy compleja ya que realiza una calibración matemática de forma simultánea para la determinación del tipo de elemento finito y densidad de malla óptima, que aproxima la solución a los problemas de taludes.
- Métodos de equilibrio límite: se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Se pueden clasificar a su vez en dos grupos:

- Métodos exactos: la aplicación de las leyes de la estática proporciona una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura, etc.). Esto sólo es posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura plana y la rotura por cuñas.
- Métodos no exactos: En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las

dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizando dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

- Métodos aproximados: no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.
- Métodos precisos o completos: cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso.

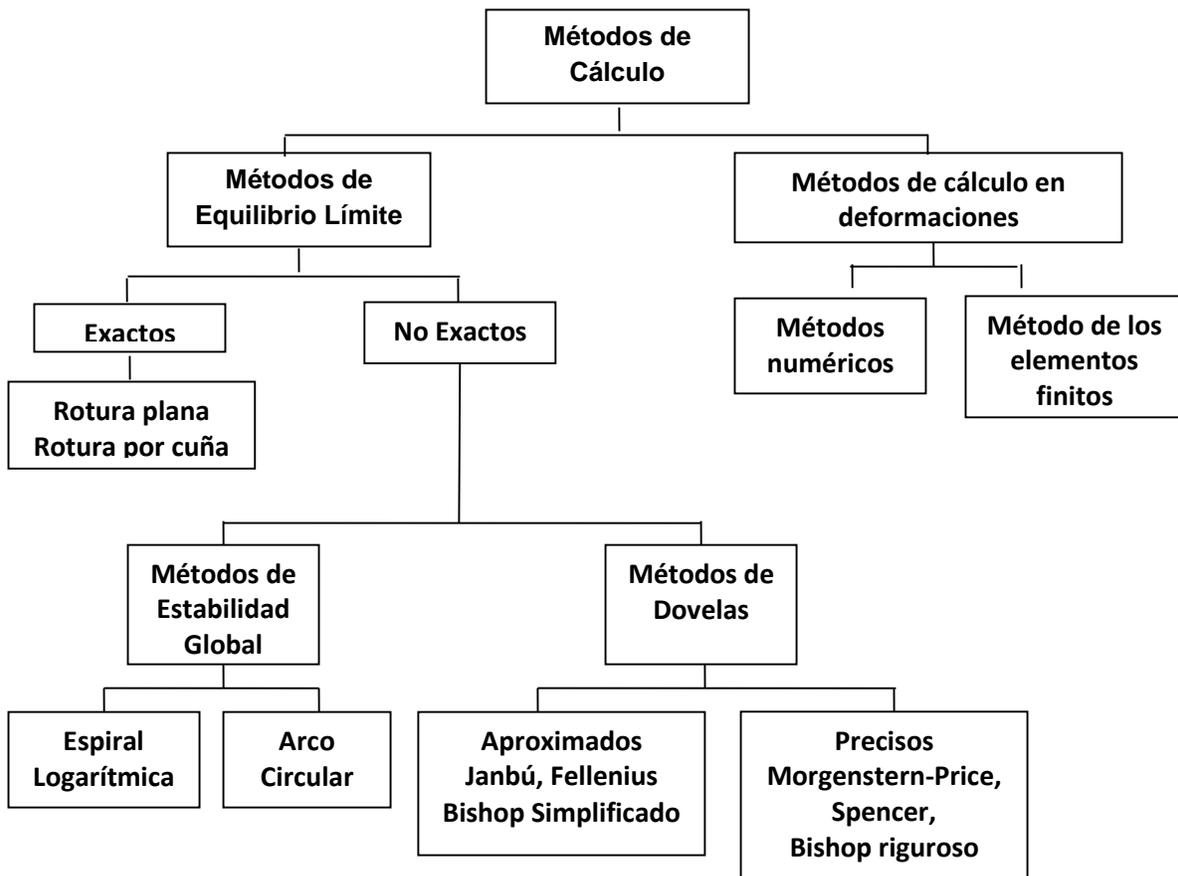


Figura 1.1 Resumen de los Métodos de Cálculo. (Errera.2000)

Barrera y Campaña (2015) plantean que los métodos de equilibrio límite más comunes son: Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Janbu Generalizado, Spencer, Morgenstern-Price. Se afirma que, uno de los más precisos es el de Morgenstern-Price, ya que puede ser pueden aplicar tanto a superficies de rotura circulares como no circulares. Es un método parecido al método de Spencer, pero permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas. Considera que las tensiones y las fuerzas varían continuamente en la superficie, satisfacen el equilibrio de fuerzas y momentos.

En resumen, entre los métodos de cálculo para realizar el análisis de estabilidad de taludes se encuentran los de equilibrio límite que analizan la estática y los de cálculo tenso-deformacional. Dentro de los métodos de equilibrio límite uno de los más precisos es el de Morgenstern-Price, ya que satisfacen el equilibrio de fuerzas y momentos. Y el método tenso-deformacional además de considerar las leyes de la estática, analiza las deformaciones del terreno al aplicar el método de los elementos finitos, divide la masa de suelo en unidades discretas que se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos, analiza los desplazamientos y presenta los resultados en forma de esfuerzos a los puntos nodales.

1.3 Análisis del factor de seguridad en la estabilidad de taludes

El concepto de Factor de Seguridad nace de la necesidad tanto de proveer seguridad a las obras y elementos diseñados y construidos, como de optimizar los mismos (González, 2006).

En la práctica general de la Ingeniería Civil se emplean Factores de Seguridad (FS) que tienen como objetivo final evitar la falla de los elementos construidos y diseñados, los cuales debe de asegurarse que sean coherentes y que realmente aseguren la intensidad de seguridad y optimización de las obras. El análisis de estabilidad se aplica al diseño de taludes o cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un FS adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costos de ejecución, consecuencias o riesgos que podrían causar su rotura, etc.

Para los taludes de presas de tierra se define un FS mínimo que está en función de la importancia de la obra. Para realizar el análisis estático de forma global es usual tomar el valor de 1.5 como factor de seguridad mínimo para que se considere que el talud es estable y seguro (Torres Vila, 1986); Mesa et al., 2014). Sin embargo, algunas normas y autores consideran un FS mínimo para terraplenes y presas en función del análisis realizado (estático y dinámico) (tabla 1.1)

Tabla 1.1 Factores de seguridad permisibles considerados por diferentes normas y autores según el tipo de análisis

Referencia	Análisis estático	Análisis dinámico
Torres Vila (1986)	≥ 1.5	--
Alva e Infantes (2001)	≥ 1.5	> 1
Abramson et al. (2002)	–	> 1
AASHTO-LRFD (2014)	1.33-1.53	> 1.1

Fuente: (AASHTOLRFD, 2014); (Alva e Infantes, 2001); (Abramson et al., 2002) ; (Gazetas et al., 2014)

En la Tabla 1.2 (Barrera y Campaña, 2015) recomiendan los valores de factores de seguridad para presas de colas:

Tabla 1.2 Factores de seguridad

Condiciones	Factor de Seguridad	Consideraciones
Estático	≥ 1.5	Diseño seguro
Sísmico	≥ 1.1	El diseño se considera seguro.
Post-sismo	≈ 1.0	El diseño se considera finalmente seguro.

Fuente: (Barrera y Campaña, 2015)

En el Federal Guidelines for Dam Safety, Earthquake Analyses and Design of Dams (2005), en su Capítulo IV Análisis Sísmico, inciso C Embankment Dams, se emiten los criterios en cuanto al factor de seguridad estático y dinámicos, Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Factores de seguridad

Condiciones	Factor de Seguridad
Estático (para cualquier superficie potencial de falla)	≥ 1.5
Dinámico	> 1.0

Fuente: (Federal Guidelines for Dam Safety, 2005)

De los factores de seguridad establecidos por Torres Vila (1986), Alva e Infantes (2001), Abramson et al. (2002), *Federal Guidelines for Dams Safety* (2005) y Barrera y Campaña (2015), tanto estáticos como dinámicos se realizó el siguiente análisis. En el caso de los factores de seguridad estáticos normados para presas varían entre 1.10 y 1.50 el valor que se repite en tres ocasiones es 1.5 siendo este el valor a emplear para evaluar el factor de seguridad estático de los taludes de la presa de cola. Para realizar el análisis del factor de seguridad ante acción dinámica los factores de seguridad analizados en presas varían entre 1.0, 1.10, 1.15, siendo el valor de 1 el más repetido, por lo que será el valor a comparar para analizar la estabilidad ante acción dinámica y verificar los factores de seguridad dinámicos de la presa de cola.

1.4 Software GeoStudio 2012

GeoStudio 2012 es una serie de productos que permiten modelar problemas geotécnicos, geo-ambientales e ingenieriles. Consta con un paquete de programas compuesto por diferentes herramientas con distintos usos y funcionalidades:

- Slope/W cálculo de estabilidad de taludes.
- Seep/W cálculo de redes de flujo.
- Sigma/W orientado al cálculo tenso-deformacional.
- Quake/W cálculo de los efectos de sismos en suelos y estructuras de suelos (presas, terraplenes, etc).
- Temp/W aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos.
- Ctran/W aplicado a fenómenos de contaminación de suelos.
- Vadose/W empleado en la modelación de acuíferos.

Dentro de estos componentes para realizar el análisis de estabilidad de la presa se emplearán Slope/ W, Seep/W y Quake/W, esto posibilita la obtención de resultados más precisos.

1.4.1 Herramienta Slope/W. Análisis estático

Para la presente investigación se utiliza el paquete SLOPE/W, que permite realizar análisis de estabilidad mediante equilibrio límite, tanto para rocas o suelos, por medio de este se obtendrá el factor de seguridad estático, los principales aspectos para realizar este tipo de análisis son:

- Métodos de cálculo:

El programa permite realizar el cálculo de estabilidad a través de los siguientes métodos:

- Ordinario (Fellenius).
- Bishop simplificado.
- Janbu simplificado.
- Spencer.
- Morgentern-Price.
- Superficies de deslizamiento:

Dispone de distintos sistemas de modelación de las superficies de rotura:

- Malla de centros y límites de radios
- Zonas de entrada y salida acotando los posibles radios de rotura.
- Presión hidrostática:

Se puede obtener las acciones de la presión de poro en el terreno a través de los siguientes sistemas:

- Línea piezométrica
- Función de altura piezométrica.
- Otros análisis basados en archivos de Seep/W donde ya se han creado los campos de presiones de poro.
- Propiedades de los suelos:

Las propiedades del suelo deben ser introducidas para realizar el análisis de estabilidad. Estos parámetros físico-mecánicos del suelo son:

- Peso específico del suelo
- Cohesión
- Ángulo de fricción interna

1.4.2 Herramienta Seep/W. Análisis de filtración del suelo

SEEP/W realiza el análisis de filtraciones con el objetivo principal de obtener la Línea de Corriente Superior (LCS) y utilizar las condiciones de presión de agua en los poros en el análisis de estabilidad cuando se analice la presa en la etapa de explotación, los principales aspectos son:

- Tipos de análisis:

El programa permite realizar los cálculos de redes de flujo a través de dos tipos fundamentales de análisis:

- Régimen estacionario, el tiempo no interviene como variable en el proceso.
- Régimen transitorio, se tiene en cuenta la evolución del sistema con el tiempo.
- Propiedades de los suelos:

Con objeto de modelar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento.

Permeabilidad del terreno.

Modelo de estado saturados o insaturado/saturado

- Condiciones de contorno del problema:

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello dispone de las siguientes opciones:

- Altura piezométrica
- Altura de presión

1.4.3 Herramienta Quake/W. Análisis dinámico

QUAKE /W es un programa geotécnico que se basa en elementos, finitos que analiza la ladera de forma dinámica para lo cual se introduce un acelerograma. Analiza los esfuerzos en cada punto del acelerograma y calcula el incremento de aceleración en todos los nodos de la ladera. Los principales aspectos para realizar este tipo de análisis son:

- Condiciones de frontera

Quake/w ha sido programado para que el movimiento de la estructura o el dominio sea relativo a algún tipo de desplazamiento especificado. La función de las condiciones de frontera es dar al problema un marco de referencia.

- Modelos constitutivos

Respecto a los modelos constitutivos, QUAKE/W reconoce dos tipos de relaciones esfuerzo/deformación: el modelo lineal-elástico y el modelo lineal-equivalente.

Modelo lineal-elástico: En este caso se asume un comportamiento lineal de los esfuerzos respecto a las deformaciones, lo que no resulta muy útil para representar condiciones de campo pues esta relación lineal no existe en la realidad. Aun así se trata de una herramienta bastante práctica para aprender, probar y verificar.

Modelo lineal-equivalente: En este caso, la rigidez del suelo se modifica en respuesta a las deformaciones computadas. Lo que hace el programa es iniciar un análisis con un valor de rigidez dado, para irlo modificando según lo indiquen las funciones especificadas y determinar los esfuerzos en la masa de suelo a partir de un registro sísmico.

- Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales indispensables para realizar un análisis dinámico están relacionadas con el modelo lineal-elástico o en el análisis lineal-equivalente.

Modelo elástico-lineal: peso específico, coeficiente de Poisson, módulo de cortante máximo, amortiguación, función de presión de poro.

Modelo Lineal Equivalente: peso específico, coeficiente de Poisson, cohesión y ángulo de fricción interna, módulo de cortante máximo, función de presión de poro.

- Fuerzas dinámicas

Al introducir acelerogramas las aceleraciones del sismo que generan las fuerzas dinámicas serán aplicadas a todos los nodos en la malla de elementos finitos para acelerar el modelo y simular la acción del sismo. Además, calcula los desplazamientos y velocidades asociadas al registro de aceleraciones importado. Estas aceleraciones importadas y los desplazamientos verticales computados, junto con la historia de

movimientos relativos obtenidos del análisis dinámico, están referidos como historias de movimientos absolutos.

Conclusiones parciales del capítulo

1. Los factores que más inciden en la estabilidad dinámica de presas de colas son geología y sismicidad de la región, propiedades mecánicas de los materiales del terraplén y la cimentación, así como el método de construcción.
2. Entre los métodos de cálculo para realizar el análisis de estabilidad de taludes se encuentran los métodos de equilibrio límite que analizan la estática y los métodos de cálculo tenso-deformacional. Dentro de los métodos de equilibrio límite el Morgenstern-Price es uno de los más precisos, ya que satisface el equilibrio de fuerzas y momentos. Y el tenso-deformacional además de considerar las leyes de la estática, analiza las deformaciones del terreno aplicando el método de los elementos finitos.
3. Los factores de seguridad establecidos por diferentes autores y bibliografías arrojaron que para determinar la estabilidad de los taludes de las presas de cola, los valores de factor de seguridad a comparar ante condición estática es 1.5 y condición dinámica 1.
4. El software GeoStudio 2012 se puede emplear para realizar el análisis de estabilidad de taludes a través de tres herramientas, Slope/W para el análisis de estabilidad estático, Seep/W para el análisis de filtración y Quake/W para el análisis dinámico, con la inserción de acelerogramas y parámetros dinámicos.

CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DE TALUDES A TRAVÉS DEL SOFTWARE GEOSTUDIO 2012. CASO DE ESTUDIO PRESA DE COLA YAGRUMAJE, MOA, HOLGUÍN

Introducción al capítulo

En el presente capítulo se muestran los resultados de la investigación, donde se desarrolla un procedimiento para el análisis de estabilidad de taludes a través del software GeoStudio 2012. Para ello, se tiene en cuenta tres tipos de análisis, el estático a través de la herramienta Slope/W, el análisis de filtración con la herramienta Seep/W, y el análisis dinámico mediante la herramienta Quake/W que tiene en cuenta la inclusión de parámetros dinámicos y acelerogramas. Se aplica el procedimiento en el análisis dinámico de los taludes de la presa de cola Yagrumaje como caso de estudio.

2.1 Diseño del procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través el software GeoStudio 2012

En este epígrafe se propone el procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través el software GeoStudio 2012 el mismo se estructura por cinco etapas y 23 pasos como se muestra a continuación en la figura 2.1:

- Etapa I. Crear la hoja de trabajo.
 - Paso 1.1 Asignar Tamaño de la hoja.
 - Paso 1.2 Definir la escala y unidades de cálculo.
 - Paso 1.3 Definir el espaciado de malla.

- Etapa II. Introducir la geometría del objeto de estudio.
 - Paso 2.1 Crear los ejes del boceto.
 - Paso 2.2 Introducir los puntos de los contornos.
 - Paso 2.3 Conformar regiones.

- Etapa III. Análisis de filtración utilizando la herramienta Seep/W

- Paso 3.1 Introducir análisis de filtración.
- Paso 3.2 Definir las propiedades de los suelos.
- Paso 3.3 Asignarlas propiedades de suelos a las regiones.
- Paso 3.4 Definir de las condiciones de contorno.
- Paso 3.5 Aplicar de las condiciones de contorno.
- Paso 3.6 Realizar los cálculos y obtener la línea de flujo.

- Etapa IV. Análisis estático utilizando la herramienta Slope/W
 - Paso 4.1 Introducir análisis estático.
 - Paso 4.2 Definir las propiedades de los suelos.
 - Paso 4.3 Asignarlas propiedades de suelos a las regiones.
 - Paso 4.4 Dibujar las superficies de deslizamiento
 - Paso 4.5 Realizar los cálculos y obtener el factor de seguridad estático para comparar con FSE_{min} .

- Etapa V. Análisis estático utilizando la herramienta Quake /W
 - Paso 5.1 Introducir análisis dinámico.
 - Paso 5.2 Definir las propiedades de los suelos.
 - Paso 5.3 Asignarlas propiedades de suelos a las regiones.
 - Paso 5.4 Introducir fuerzas dinámicas (acelerogramas)
 - Paso 5.5 Definir las condiciones de frontera.
 - Paso 5.6 Realizar de los cálculos y obtener del factor de seguridad dinámico para comparar con FSD_{min} .

PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE DINÁMICO DE TALUDES A TRAVÉS DEL SOFTWARE GEOSTUDIO 2012

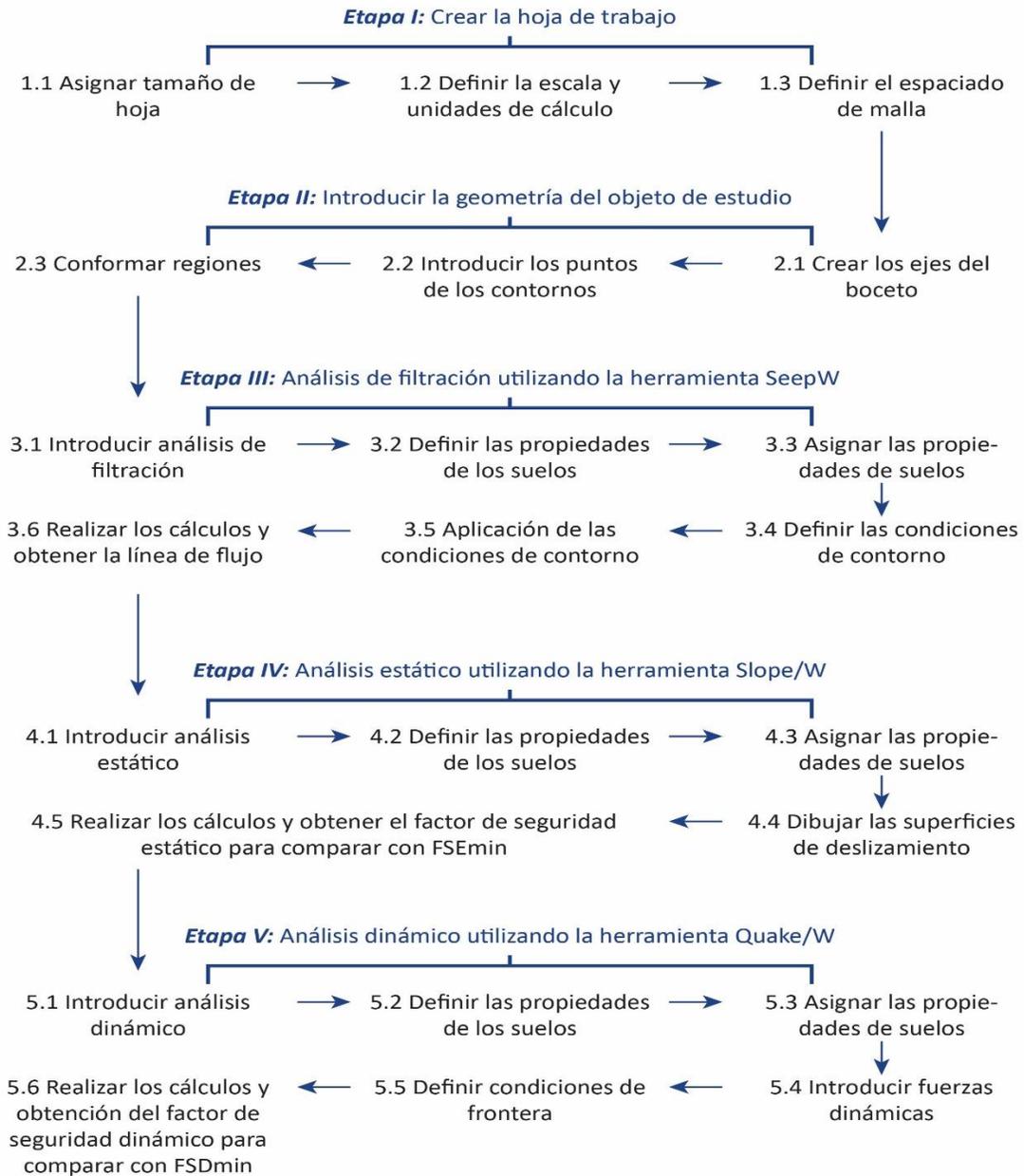


Figura 2.1 Procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través el software GeoStudio 2012

2.2 Aplicación del procedimiento para el análisis dinámico de taludes a través del software GeoStudio 2012 en la presa de cola Yagrumaje, del municipio Moa, provincia Holguín.

A continuación se aplica el procedimiento propuesto al caso de estudio presa de cola Yagrumaje. La misma se encuentra ubicada en el municipio Moa, provincia Holguín. Debido a la cercanía de fallas sismo generadoras, no pueden presentar fallas debido a la importancia socio-económica-ambiental de la región.

- Etapa I. Crear la hoja de trabajo.
 - Paso 1.1 Asignar Tamaño de la hoja.

Para este caso, se va a definir un área de trabajo de 400 mm de ancho x 300 mm de alto.

Para definir el tamaño del área de trabajo:

Se selecciona en el desplegable Entornos Geométricos, Página, como se observa en la figura 2.2:



Figura 2.2.-Opción Entornos Geométricos / Página

Luego aparece el cuadro de dialogo Configurar página, como se muestra en la figura 2.3, donde se activa las unidades de trabajo, que en este caso es en milímetros (mm) y se asigna los valores del área de trabajo, ancho y alto.

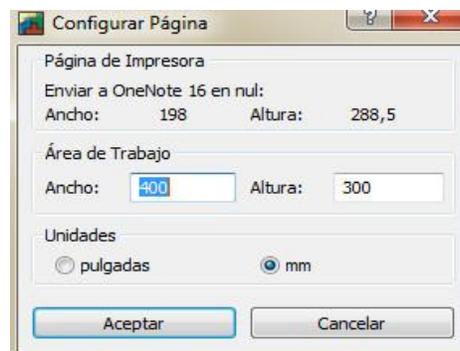


Figura 2.3.-Opciones de Configurar Página

- Paso 1.2 Definir la escala y unidades de cálculo.

Se selecciona en la etiqueta Entornos Geométricos, Unidades y Escala, como se indica en la figura 2.4. Se fija como Unidades de ingeniería (Métrico) y se marca como unidades de Fuerza (F) KiloNewtons. Luego se establecen los límites del problema en -60 (mínimo de X) y en -70 (mínimo de Y), la escala horizontal cambia a 1.250 y la vertical a 1.250 como se muestra en la figura 2.5



Figura 2.4.-Opción Entornos Geométricos / Unidades y Escala

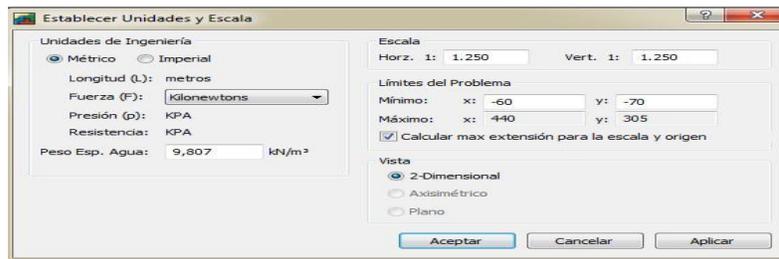


Figura 2.5.-Opción Entornos Geométricos /Unidades y Escala pantalla de trabajo

- Paso 1.3 Definir el espaciado de malla.

La visualización de la malla en el fondo del área de trabajo constituye una ayuda fundamental a la hora de dibujar y visualizar el perfil del talud. De tal modo que, se puede ajustar a la malla cualquier punto de nuestro perfil, esta herramienta es similar a las que existen en los programas CAD.

Para definir la malla se selecciona Cuadrícula en el desplegable Entornos Geométricos, como se indica en la figura 2.6 y aparece un cuadro de diálogo donde se anota el espaciado de la malla, ver figura 2.7.



Figura 2.6.-Opción Entornos Geométricos >Cuadrícula



Figura 2.7.-Opción Entornos Geométricos / Cuadrícula Pantalla de trabajo

Se anota 10 en el espaciado de X y 10 en el de Y, para definir el espaciado de la malla.

- Etapa II. Introducir la geometría del objeto de estudio.

La introducción de la geometría del problema a analizar es de relativa facilidad ya que prácticamente se puede introducir cualquier geometría debido a las herramientas gráficas que posee el programa, mediante dibujo directo de las regiones o la introducción de los puntos de contorno, además cuenta con la posibilidad de interactuar con el programa AutoCad para importar las regiones previamente dibujadas.

- Paso 2.1 Crear ejes del boceto.

Seleccionar *Ejes* del menú *Boceto*, ver figura 2.8:

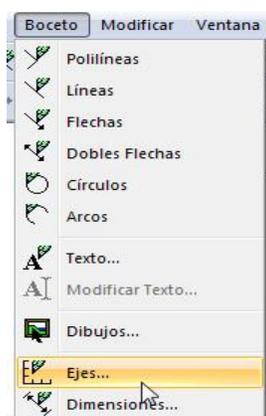


Figura 2.8.-Opción Boceto / Ejes

Aparece el cuadro de diálogo Introducir Ejes, como se muestra en la figura 2.9, se escriben los títulos de los ejes, para el eje X: Distancia (m) y para Y: Elevación (m). Se

rellenan las casillas distancias mínimas y máximas, así como el incremento de tamaño en cada uno de los ejes, y aparece una imagen de los Ejes del modelo como se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.9.-Opción Introducir Ejes Pantalla de trabajo

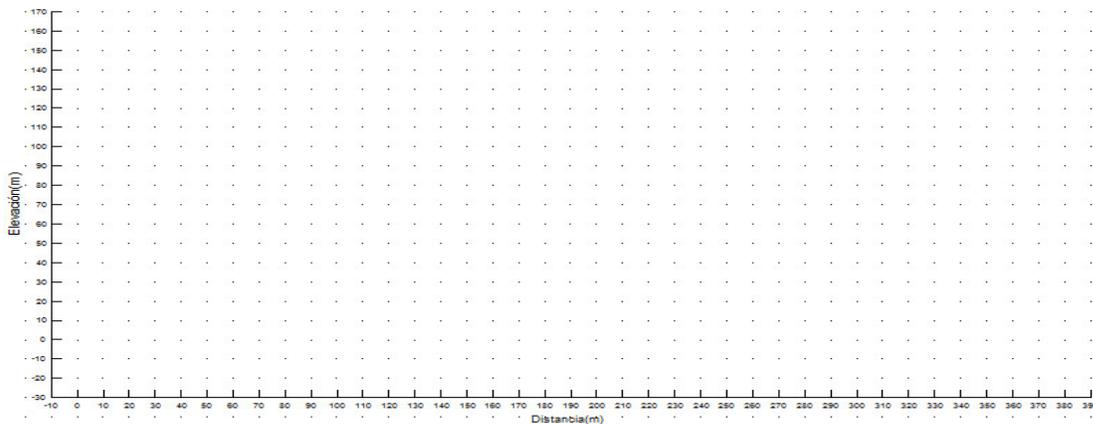


Figura 2.10.-Ejes del modelo

- Paso 2.2 Introducir los puntos de los contornos.

Para definir los contornos del perfil que va a condicionar el cálculo se procede de la siguiente forma:

Seleccionar Puntos en el menú desplegable Introducir, como se ve en la figura 2.11:

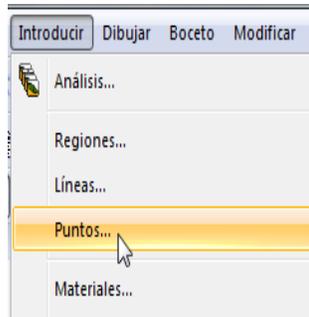


Figura 2.11.-Comando para la introducción de la geometría a través de puntos

Aparece el cuadro de dialogo Introducir Puntos, ver figura 2.12 y se establecen las coordenadas de cada de los puntos que conforman la presa (Anexo 2)



Figura 2.12.-Ventana para la introducción de los puntos

Tras la introducción de cada punto se pulsa el botón Enter del teclado y el punto pasa a la lista, ver en la figura 2.13.

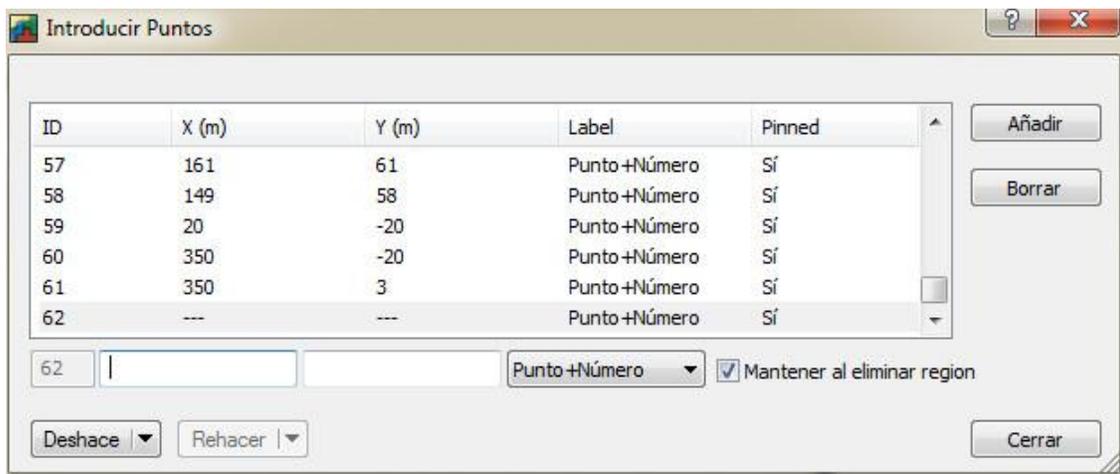


Figura 2.13.-Coordenadas de los puntos introducidos

En la figura 2.14 se logra ver los resultados de la introducción de los puntos en el modelo.

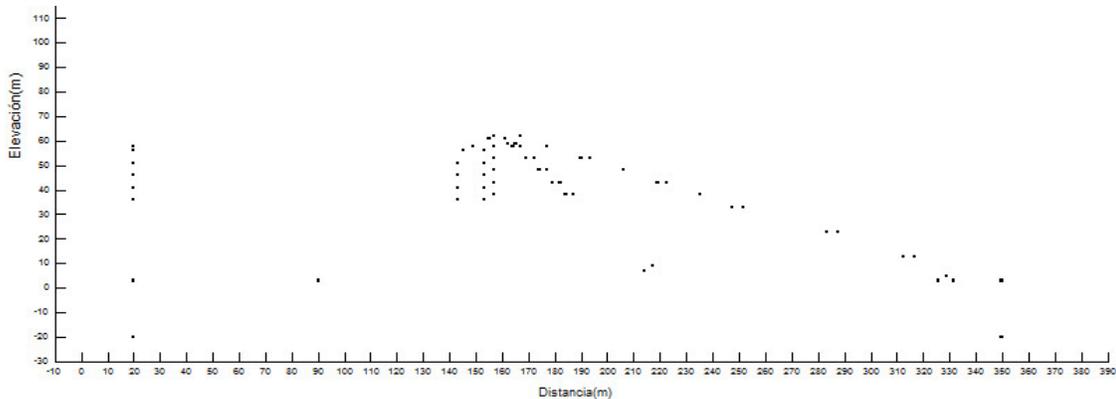


Figura 2.14.-Vista de los puntos introducidos

- Paso 2.3 Conformar regiones

Se selecciona Regiones en el menú desplegable Dibujar, ver figura 2.15.



Figura 2.15.-Activación de la opción de introducción de regiones

Se pulsa con el botón izquierdo del ratón los puntos que definen el contorno (Anexo 3) cerrando el contorno en el punto de origen, ver figura 2.16

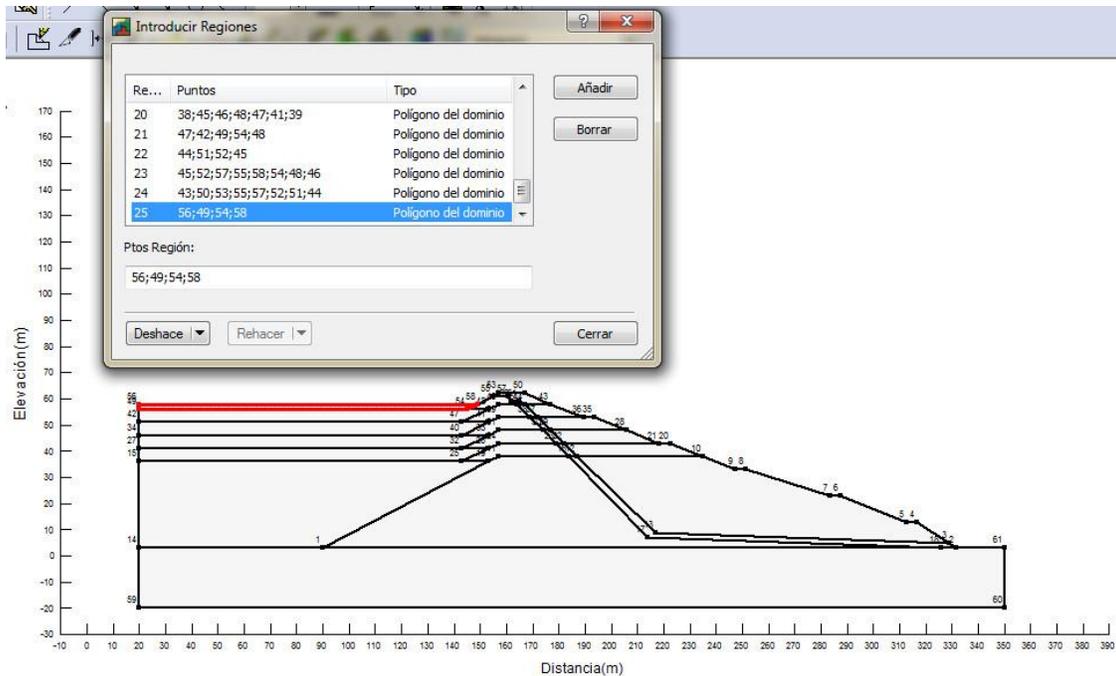


Figura 2.16.-Definición de las regiones

- Etapa III. Análisis de filtración utilizando la herramienta Seep/W

En esta etapa se realiza un análisis de filtración que tiene como finalidad la obtención de la Línea de Corriente Superior (LCS) y utilizar las condiciones de presión de agua en los poros para los análisis de estabilidad posteriores. De esta manera observar el comportamiento de los factores de seguridad estáticos de la presa Yagrumaje en cada una de las fases del método de construcción línea central, utilizando las propiedades de los suelos para el análisis de filtración, como se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Datos de los materiales para el análisis de filtración

Descripción	Lateritas	Colas	Filtro	Rocoso
Modelo del material	Saturado/no saturado	Saturado	Saturado/no saturado	Saturado/no saturado
Permeabilidad (m/s)	0.0001	0.0001	Mayor de 0.1	Mayor de 0.1 hasta 1

Fuente: Vázquez (2017)

- Paso 3.1 Introducir análisis de filtración

Para introducir el análisis de filtración hay que seleccionar **Análisis** en el menú desplegable **Introducir** como indica la figura 2.17:

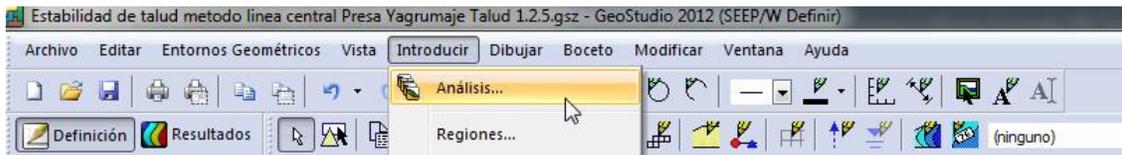


Figura 2.17.-Opción Introducir / Análisis

Activada esta opción aparece el siguiente cuadro diálogo, figura 2.18:

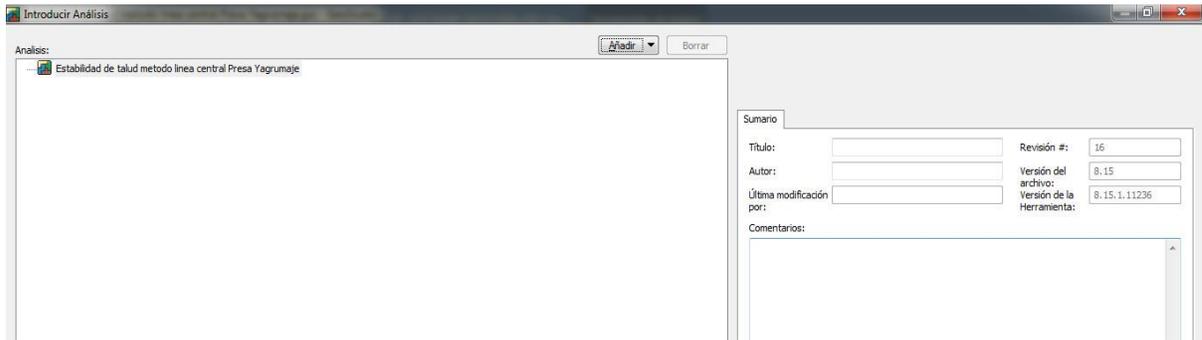


Figura 2.18.-Pantalla de la opción de introducción de análisis.

Dentro del anterior cuadro de diálogo se activa la lista desplegable **Añadir** y se selecciona la opción **Análisis Seep/W** y desplegando este último seleccionar **Estado Estacionario**, como se muestra en la figura 2.19:

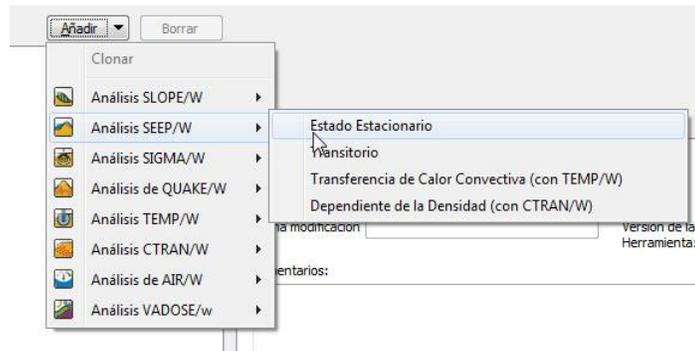


Figura 2.19.-Selección del tipo de análisis.

Aparece el siguiente cuadro de opciones de identificación del tipo de análisis, ver figura 2.20:



Figura 2.20.-Opciones de identificación del tipo de análisis.

Se rellena la casilla Nombre con el nombre Análisis de Filtración.

- Paso 3.2 Definir las propiedades de los suelos.

Seleccionar Materiales en el menú desplegable Introducir, como se ve en la figura 2.21:



Figura 2.21.-Opción Introducir / Materiales

Al hacer clic izquierdo aparece el siguiente cuadro de diálogo, donde en la parte derecha hay que desplegar la lista Añadir y pulsar Nuevo, ver figura 2.22. Se introducen los materiales como se muestra en la figura 2.23:

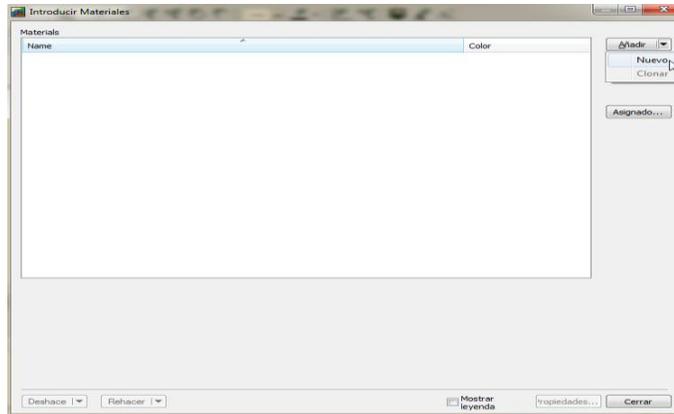


Figura 2.22.-Introducción de tipos de materiales

- Material_1 nombre: Colas Saturadas, Material Modelo: Saturado Solamente, Permeabilidad (X-Conductibilidad saturada):0.0001m/seg,(Tabla 2.1), color: gris

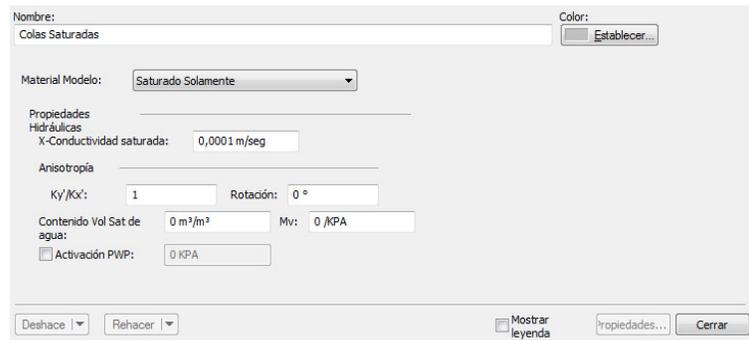


Figura 2.23.-Introducción de las características de los materiales pantalla de trabajo

- Material_2 nombre: Filtro, Material Modelo: Saturado/Insaturado, color: amarillo, figura 2.24:

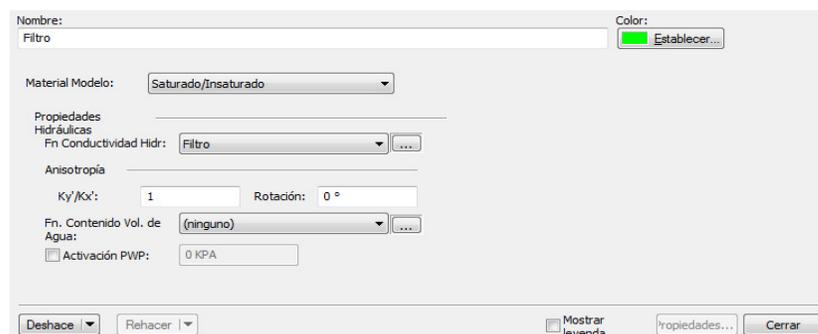


Figura 2.24.-Introducción de las características de los materiales pantalla de trabajo

Dentro de las Propiedades Hidráulicas en la opción Fn Conductividad Hidr se hace click en la lista desplegable para añadir una nueva función de conductibilidad hidráulica como se muestra en la figura 2.25:

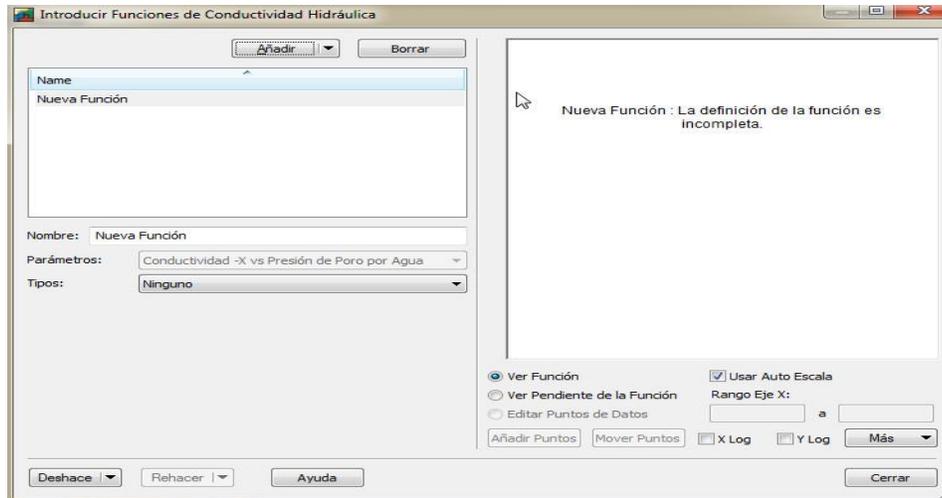


Figura 2.25.-Pantalla Introducir Funciones de Conductividad Hidráulica.

Rellenar la casilla Nombre y en la lista desplegable Tipos se escoge Datos de Puntos de la Función Hidr K, ver figura 2.26:

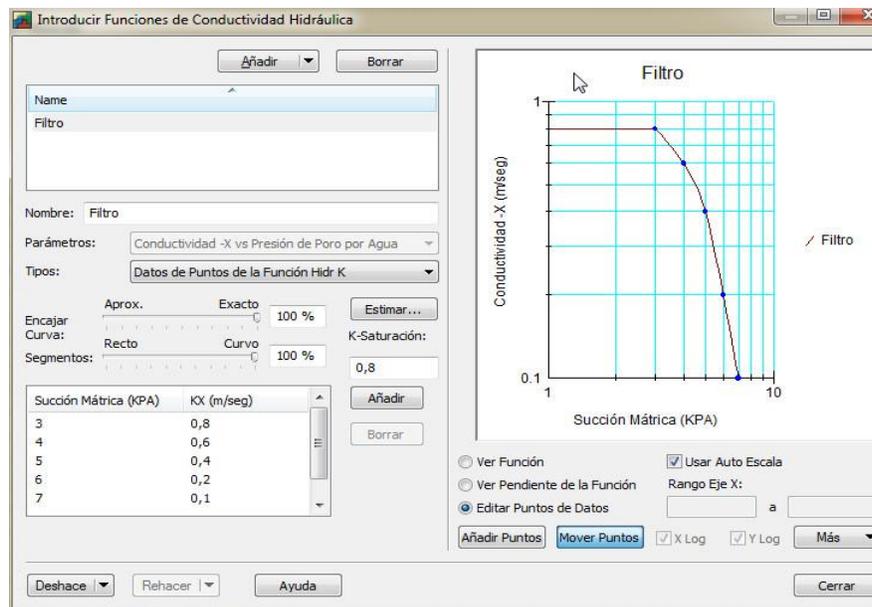


Figura 2.26.-Pantalla Introducir Funciones de Conductividad Hidráulica.

Se coloca en la casilla K-Saturación el valor de 0.8 (Tabla 2.1).

- Material_3 nombre: Laterita, Material Modelo: Saturado/Insaturado, color: Marrón, ver figura 2.27:

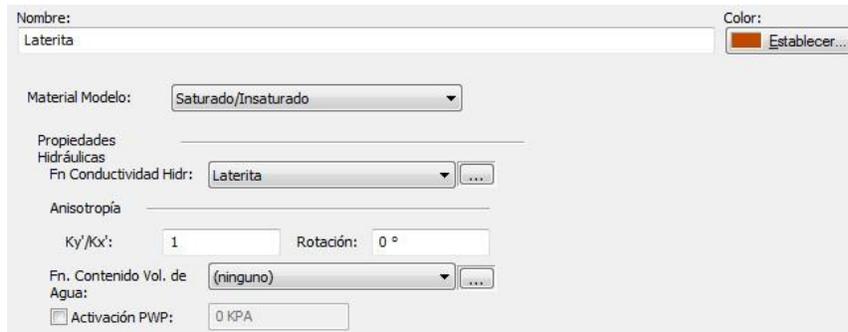


Figura 2.27.-Introducción de las características de los materiales pantalla de trabajo

En la opción Fn Conductividad Hidr se hace click en la lista desplegable para añadir una nueva función de conductividad hidráulica la cual queda como se muestra en la figura 2.28:

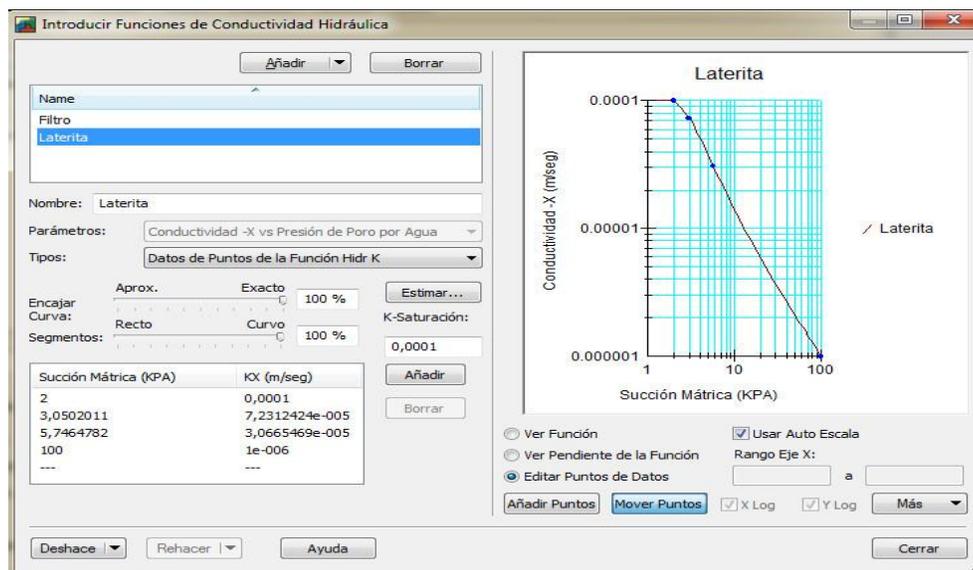


Figura 2.28.-Pantalla Introducir Funciones de Conductividad Hidráulica.

- Material_4 nombre: Rocoso, Material Modelo: Saturado/Insaturado, color: Azul, figura 2.29:

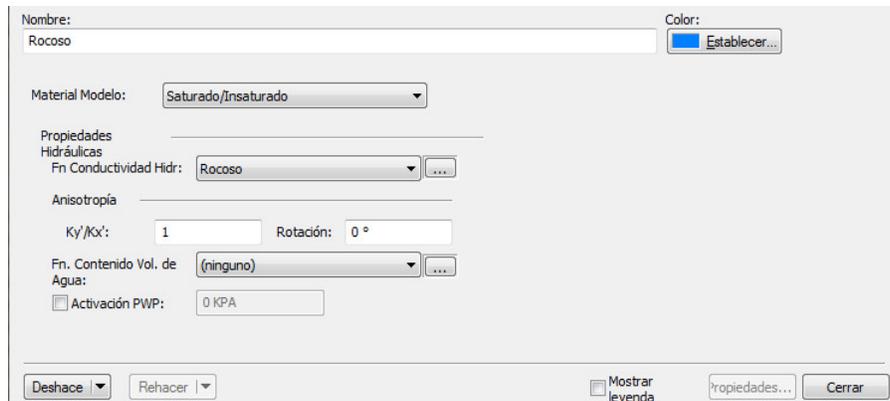


Figura 2.29.-Introducción de las características de los materiales pantalla de trabajo

Al introducir una nueva función de conductibilidad hidráulica queda de la siguiente manera:

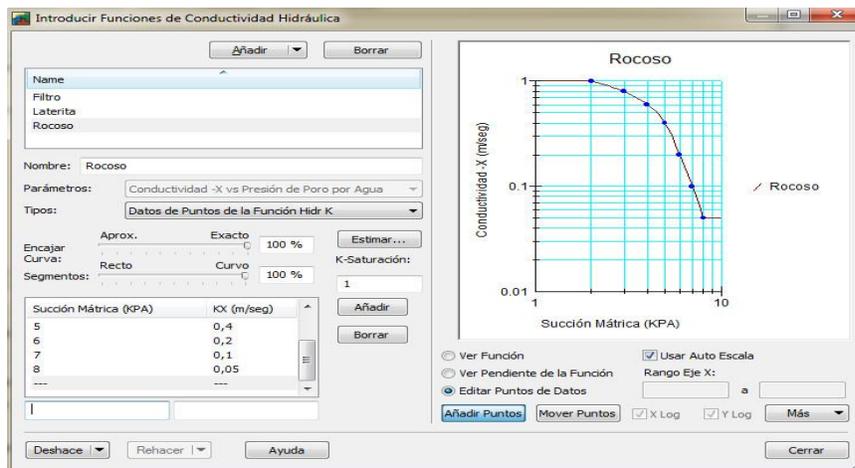


Figura 2.30.-Pantalla Introducir Funciones de Conductividad Hidráulica.

- Paso 3.3 Asignarlas propiedades de suelos a las regiones.

Se hace con la opción Dibujar / Materiales, como se ve en la figura 2.31:



Figura 2.31.-Activación del comando de aplicación de materiales

Aparece el siguiente cuadro de diálogo, ver figura 2.32:

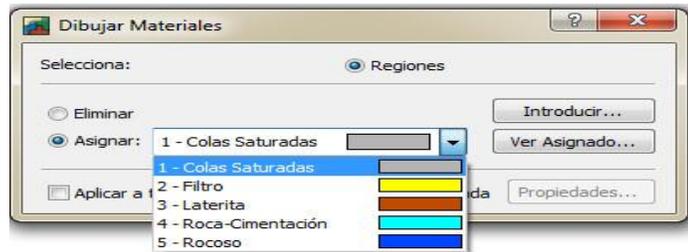


Figura 2.32.-Materiales a aplicar a las regiones definidas

En la lista desplegable se selecciona el material que se quiere aplicar, se coloca el cursor dentro de la región y hacer click con el botón izquierdo del ratón, en ese momento, la región aparece sombreada con el color del suelo donde se va a asignar las propiedades, como se muestra en la figura 2.33:

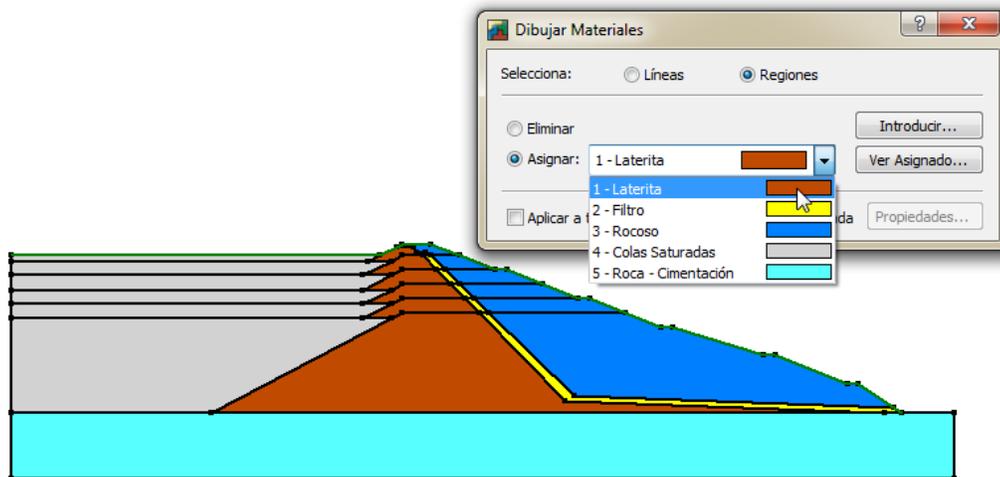


Figura 2.33.-Definición de las propiedades de las regiones

- Paso 3.4 Definir las condiciones de contorno.

Para la definición de los tipos de condiciones de contorno una vez que se ha establecido el boceto se va a poder implementar de la siguiente forma:

En el menú principal en Introducir en la opción Condiciones de límite como se ve en la figura 2.34:



Figura 2.34-Opción Introducir /Condiciones de límite

Aparece el cuadro de diálogo Introducir Condiciones de límite, donde se definirá las siguientes condiciones:

Agua, Tipo: Carga/Altura (H) con una acción a los 36m, color: Azul.

Presión Cero, Tipo: Carga de presión (P), con una acción a los 0m, color: Rojo.

Las opciones del cuadro de diálogo asociado se muestran en la figura 2.35:

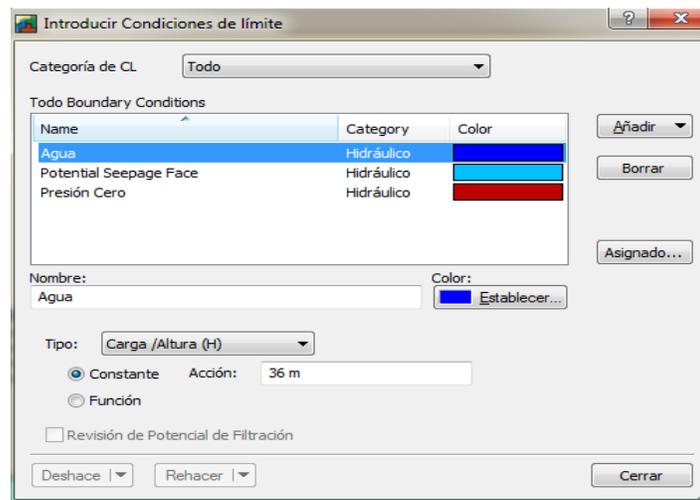


Figura 2.35.-Pantalla Introducir / Condiciones de límite

- Paso 3.5 Aplicar de las condiciones de contorno.

Una vez que se definen los tipos de contornos que aparecen se procede a indicar en el modelo en que zonas se dan unas condiciones de contorno determinadas.

En el menú principal en Dibujar, se selecciona la opción Condiciones de límite, ver figura 2.36:

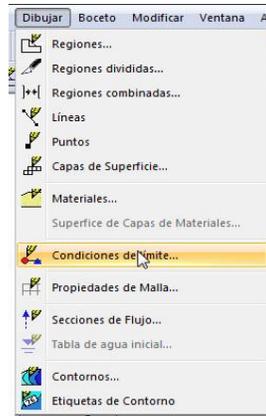


Figura 2.36.-Opción Dibujar / Condiciones de límite

Seleccionada la opción aparece la siguiente ventana, figura 2.37:

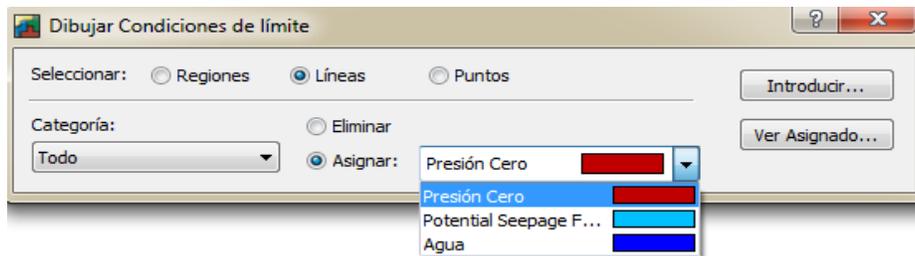


Figura 2.37.-Pantalla Dibujar / Condiciones de límite

Para asignar la condición de contorno a un dominio en concreto se marca con el ratón pulsando el botón derecho, sin soltar y envolviendo la zona a la que se quiere asignar la condición de contorno desde el primer punto al último dejándolos dentro de la selección.

Aplicando las condiciones de contorno en los límites de las regiones queda como se indica en la 2.38:

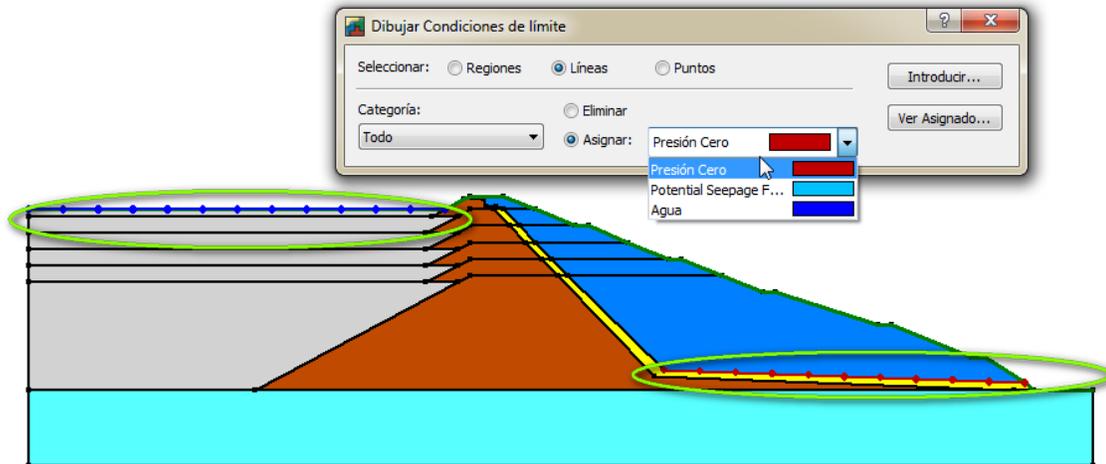


Figura 2.38.-Pantalla de modelo con las condiciones de límite

- Paso 3.6 Realizar los cálculos y obtener la línea de flujo.

Esta opción aparece integrada en la opción de análisis Gestor de Soluciones, como se muestra a continuación.

Para visualizar esta opción seleccionar Gestor de Soluciones del menú Ventana, como se ve a continuación en la figura 2.39:

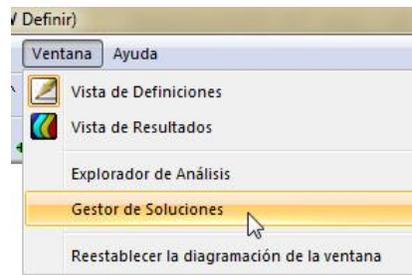


Figura 2.39.-Activación de Gestor de Soluciones

Activada esta opción sale el siguiente cuadro dialog, figura 2.40:

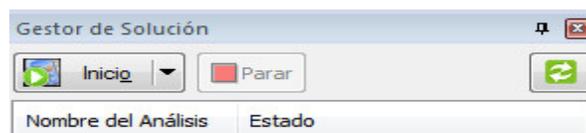


Figura 2.40.-Apariencia de Gestor de solución

Se marca hipótesis Análisis de Filtración que se quiere calcular, se pulsa en *Inicio* y si es correcto procede al cálculo.

Pulsando esta opción se obtiene la siguiente ventana de resultados, ver figura 2.41:

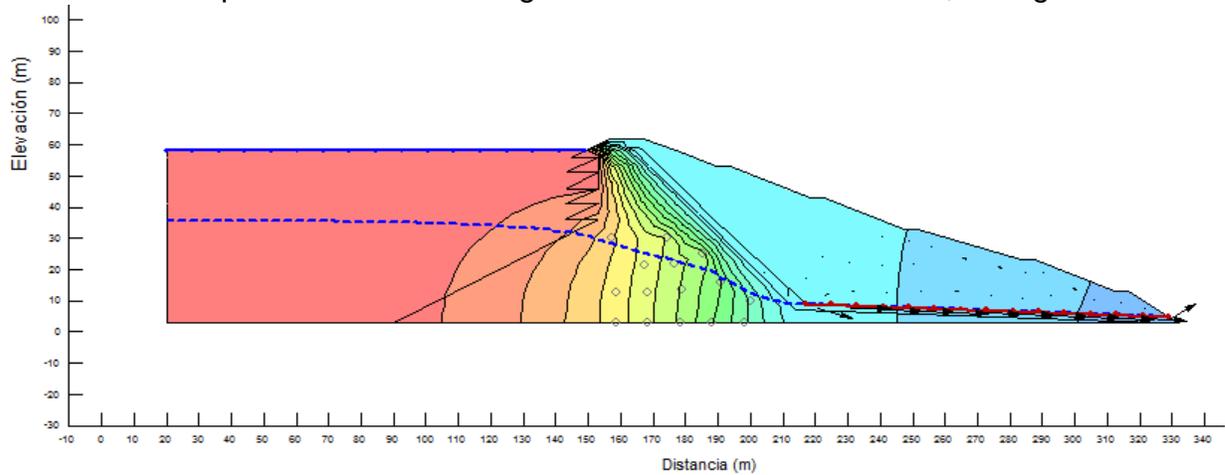


Figura 2.41.-Resultado de los cálculos realizados

Se observa como la línea de corriente superior (nivel freático) atraviesa la laterita, la cola y descarga en el punto inferior de la capa filtrante de arena, el flujo de infiltración está en la zona saturada y las presiones de agua disminuyen. Este análisis se realizó para las 6 fases del método línea central para ello se aumentó la altura del talud y se modificaron las condiciones de límites donde obtienen las presiones de poros que se requiere para la modelación de la estabilidad de los taludes en el análisis estático de cada fase con la herramienta Slope/W.

- Etapa IV. Análisis estático utilizando la herramienta Slope/W
Esta etapa tiene como finalidad la obtención de factores de seguridad estáticos de la presa Yagrumaje implementando el método de construcción línea central compuesto por 6 fases, utilizando parámetros estáticos del suelo obtenidos en las investigaciones ingeniero geológicas realizadas (ENIA Holguín,2015)

Tabla 2.2 Propiedades físico-mecánicas de los materiales

Material	Peso específico (kN/m ³)	Cohesión (Kpa)	Ángulo de fricción interna (φ)
Colas Saturadas	20,5	25	29 °
Filtro	20	0	36 °
Laterita	22	20	25 °
Roca-Cimentación	22.8	0	38 °
Rocoso	21	0	36 °

Fuente: ENIA Holguín, (2015)

- Paso 4.1 Introducir análisis estático.

Para introducir el análisis estático seleccionar **Análisis** en el menú desplegable **Introducir** como indica la figura 2.42:

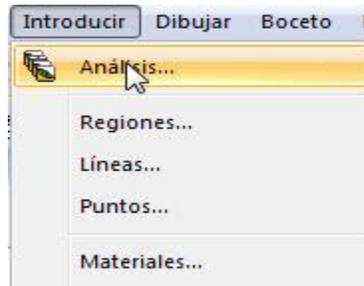


Figura 2.42.-Opción Introducir /Análisis

Activada esta opción sale el siguiente cuadro dialogo, figura 2.43:

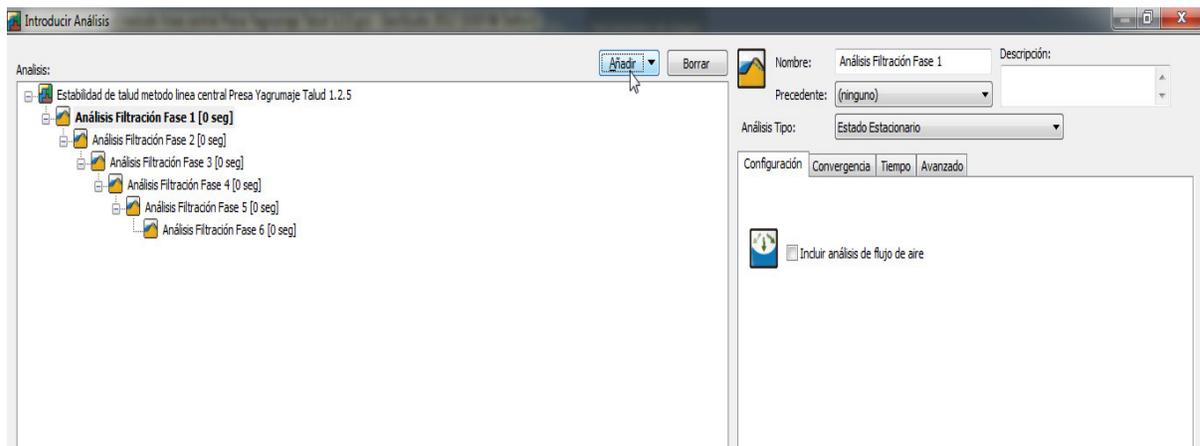


Figura 2.43.-Pantalla de la opción de introducción de análisis.

Dentro del anterior cuadro de diálogo se activa la lista desplegable **Añadir** y se selecciona la opción **Análisis Slope/W** y desplegando este último seleccionar **Equilibrio Límite**, como se muestra en la figura 2.44:

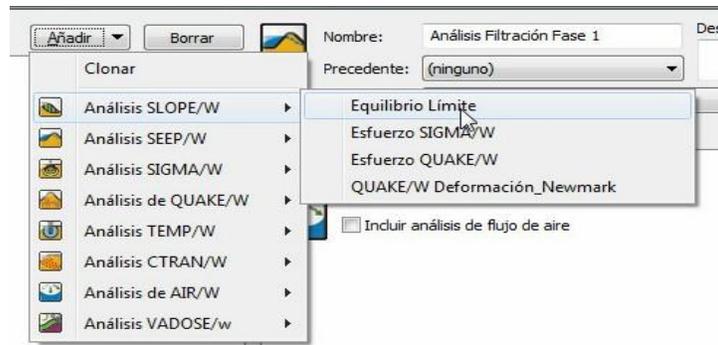


Figura 2.44.-Selección del tipo de análisis.

Aparece el siguiente cuadro de diálogo, figura 2.45:

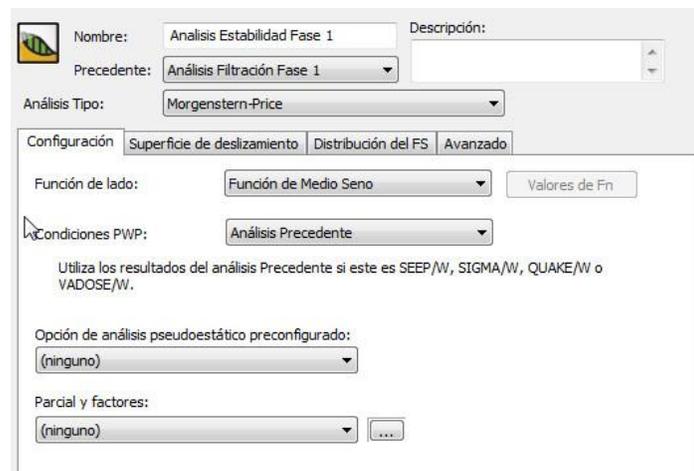


Figura 2.45.-Opciones de identificación del tipo de análisis.

Dentro del anterior cuadro de diálogo se rellena las casillas Nombre y Descripción. En la lista desplegable Precedente se escoge análisis Filtración Fase 1 para trabajar con los resultados obtenidos en dicho análisis. Se activa la lista desplegable Análisis Tipo donde se selecciona el método de cálculo Morgenstern-Price.

- Paso 4.2 Definir las propiedades de los suelos.

Seleccionar Materiales en el menú desplegable Introducir, tal como se ve en la figura 2.46:

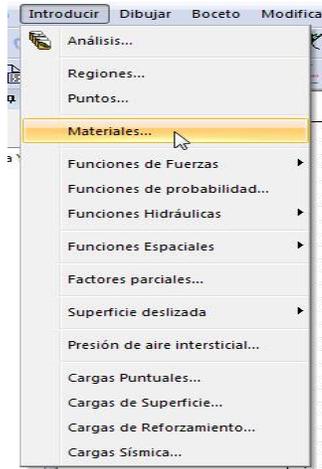


Figura 2.46.-Opción Introducir / Materiales

Una vez hecho clic aparece el siguiente cuadro de diálogo, figura 2.47:

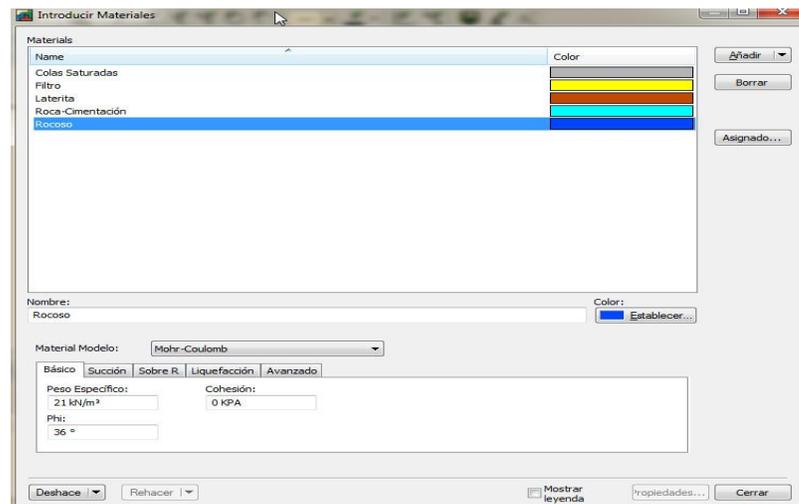


Figura 2.47.-Introducción de tipos de materiales

En el cuadro de diálogo anterior dentro del desplegable Material Modelo seleccionar Mohr-Coulomb, rellenar la casilla Nombre y colocar los valores de peso específico, cohesión y ángulo de fricción interna de cada material (Tabla 2.2).

- Paso 4.3 Asignarlas propiedades de suelos a las regiones.

Seleccionar la opción Dibujar / Materiales, como se ve en la figura 2.48:

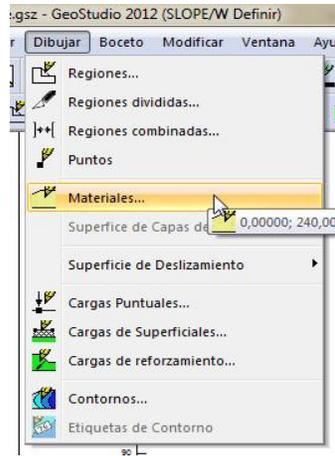


Figura 2.48.-Activación del comando de aplicación de materiales

Aparece el siguiente cuadro de diálogo, figura 2.49:

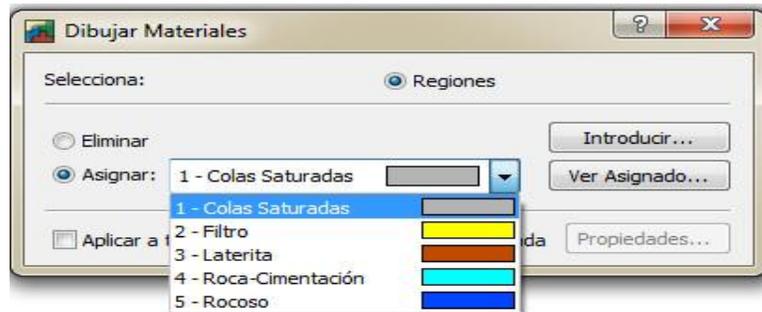


Figura 2.49.-Materiales a aplicar a las regiones definidas

En la lista desplegable se selecciona el material para aplicar, ver figura 2.50:

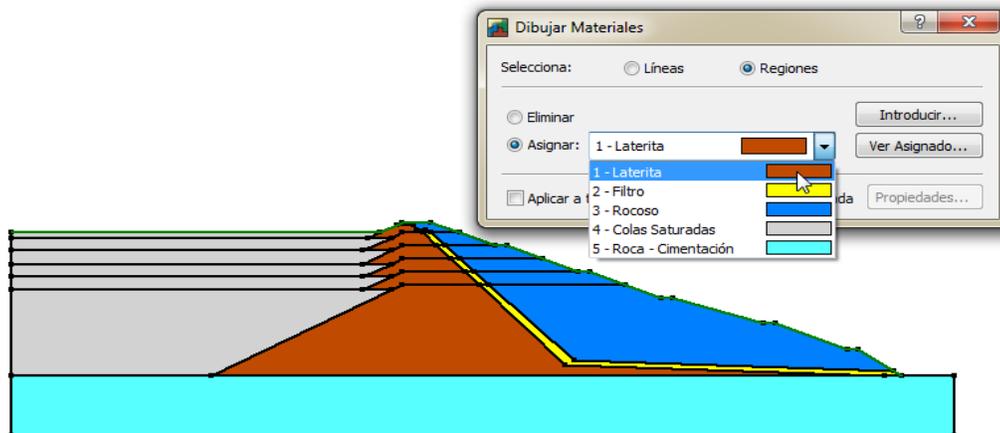


Figura 2.50.-Definición de las propiedades de las regiones

- Paso 4.4 Dibujar las superficies de deslizamiento

Seleccionar del menú desplegable Introducirse elige la opción Superficie de deslizada y desplegando este último se selecciona Entrada y salida como se puede observar en la figura 2.51.

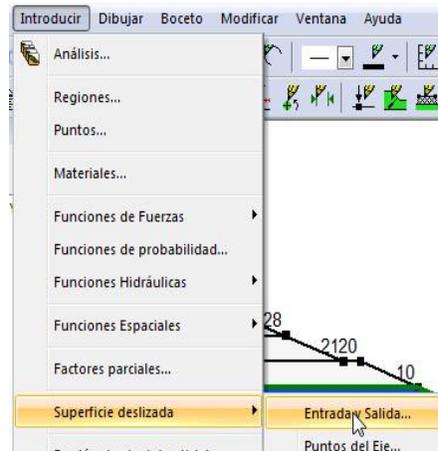


Figura 2.51.-Comando de menú para la selección de los parámetros de definición de las superficies de deslizamiento.

Aparece el siguiente cuadro de diálogo, figura 2.52:

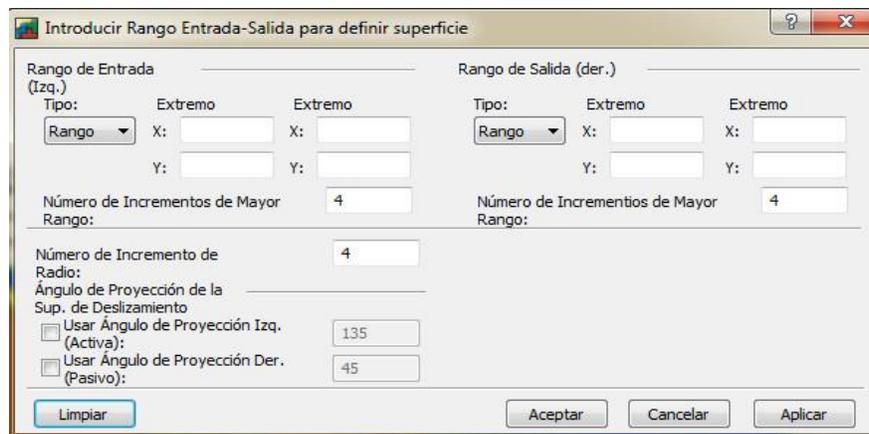


Figura 2.52.-Introducir Rango Entrada-Salida para definir superficie de deslizamiento.

El cursor del ratón se convierte en una cruz, pulsando con el botón derecho del ratón se define en el terreno los rangos de entrada y salida que se observan en la figura 2.53

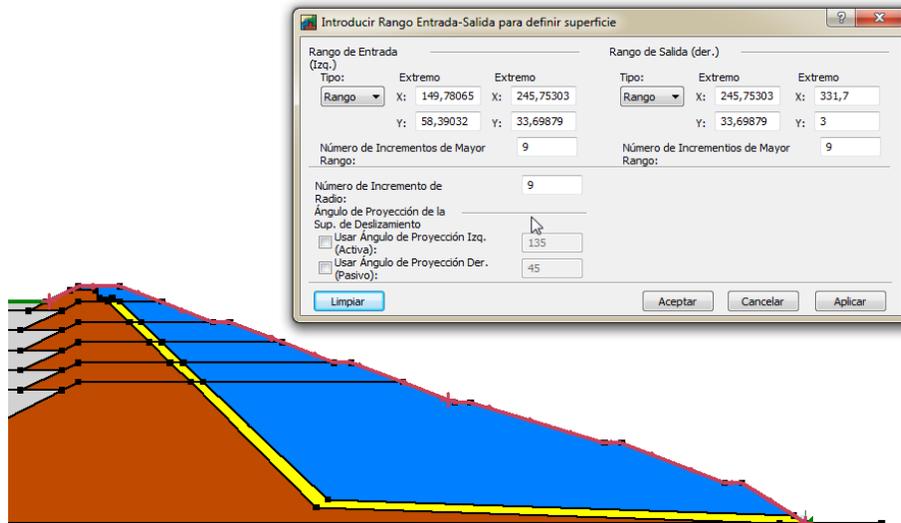


Figura 2.53.-Definición Rango Entrada-Salida para definir superficie de deslizamiento.

- Paso 4.5 Realizar los cálculos y obtener el factor de seguridad estático.

Esta opción aparece integrada en la opción de análisis Gestor de Soluciones, para visualizar esta opción se selecciona Gestor de Soluciones en el menú Ventana como se ve en la figura 2.54:

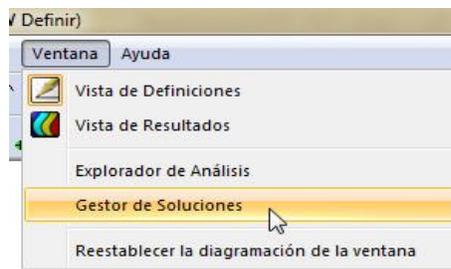


Figura 2.54.-Activación de Gestor de Soluciones

Activada esta opción sale el siguiente cuadro dialog, figura 2.55:

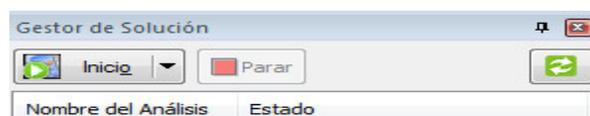


Figura 2.55.-Apariencia de Gestor de solución

Una vez marcada las hipótesis del Análisis Estático, se pulsa en Inicio y si es correcto procede al cálculo.

Al pulsar la opción Inicio se obtiene la ventana de resultados, figura 2.56:

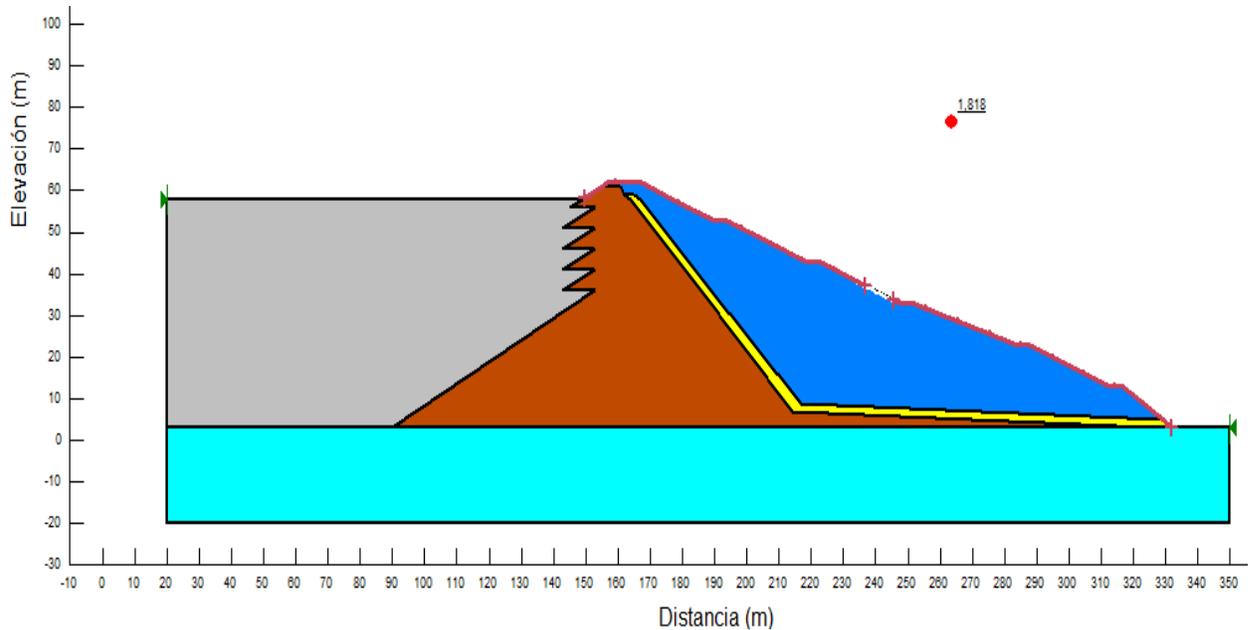


Figura 2.56.-Resultado de los cálculos realizados

Una vez terminados los cálculos aparece una imagen similar a la anterior, en la que aparece el modelo y el coeficiente de seguridad mínimo con un valor de 1.818 correspondiente a la fase 6.

Para la fase 1;2;3;4;5; se realizan nuevos análisis estáticos que se hacen precedentes del análisis estático anterior de la fase 1, en los cuales solo se modificará la altura de la presa por fases, lo que lleva consigo asignar materiales a las regiones que conforman cada una de las fases y modificar la superficie de deslizamiento, dando como resultado nuevos coeficientes de seguridad para cada fase. Estos valores son comparados con $FS_{min} \geq 1.5$ valor determinado en el Capítulo 1 como el límite a considerar para asegurar estabilidad de los taludes.

En la Tabla 2.3 se muestra la comparación entre los coeficientes de seguridad en cada una de las fases y el factor de seguridad estático permitido.

Tabla 2.3 Variación de los factores de seguridad estático en cada una de las fases.

Fases	Altura máxima (m)	FSE	FSE min
1	38	1,422	No cumple
2	43	1,541	Cumple
3	48	1,679	Cumple
4	53	1,732	Cumple
5	58	1,851	Cumple
6	62	1,818	Cumple

- Etapa IV. Análisis dinámico utilizando la herramienta Quake/W

En esta etapa se realiza el análisis dinámico de los taludes de la presa de cola Yagrumaje, para ello se aplica un movimiento sísmico a la estructura a través de un registro de aceleraciones a partir del cual se calcula las distribuciones de esfuerzos actuantes y los excesos de presión de poro con el fin de obtener los esfuerzos generados por el sismo y luego integrarlos al análisis de estabilidad en Slope/W. Se obtiene como resultado los factores de seguridad dinámicos en cada una de las fases de construcción de la presa para observar su comportamiento bajo la influencia del sismo. Las propiedades dinámicas de los materiales en este análisis están relacionadas a la rigidez (módulo de cortante y módulo de Poisson) así como las propiedades utilizadas el análisis estático (peso específico del material, presión de poros y cohesión), ver tabla 2.4.

Tabla 2.4 Propiedades dinámicas de los materiales

Material	Vs	Coef. Poisson	Gmáx(kpa)
Laterita	210	0.48	79433.9
Colas	155	0.47	41874.4
Rocoso	155	0.49	45699
Roca-Cimentación	210	0.49	83846.9
Filtro	155	0.32	39913.1

Fuente: ENIA Holguín (2015)

- Paso 5.1 Introducir análisis dinámico.

Para introducir el análisis dinámico seleccionar Análisis en el menú desplegable Introducir como indica la figura 2.57:

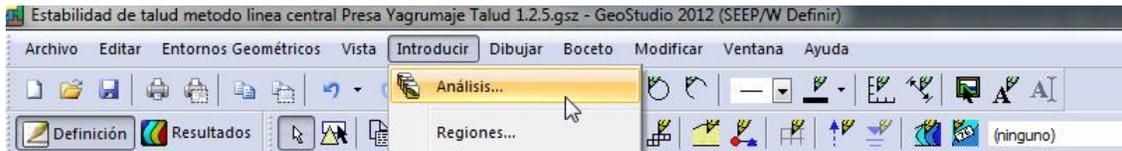


Figura 2.57.-Opción Introducir / Análisis

Activada esta opción sale el siguiente cuadro diálogo, figura 2.58:

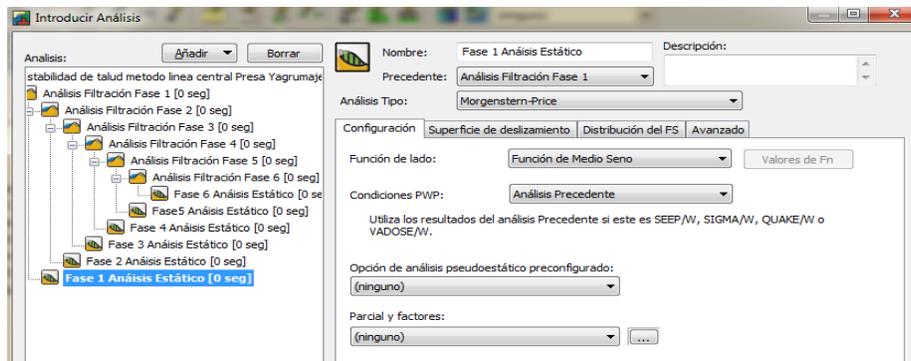


Figura 2.58.-Pantalla de la opción de introducción de análisis.

Dentro del anterior cuadro de diálogo se activa la lista desplegable Añadir y se selecciona la opción Análisis Quake/W, desplegando este último seleccionar Estado Estacionario, como se muestra en la figura 2.59:

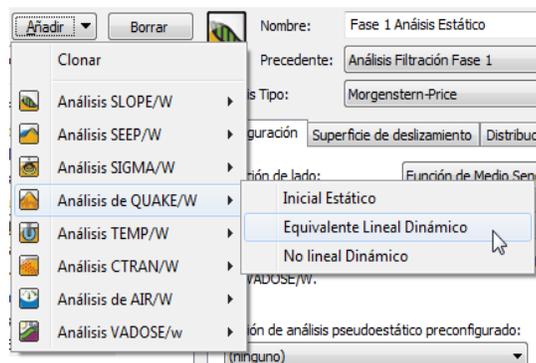


Figura 2.59.-Selección del tipo de análisis.

Aparece el siguiente cuadro de diálogo, figura 2.60:

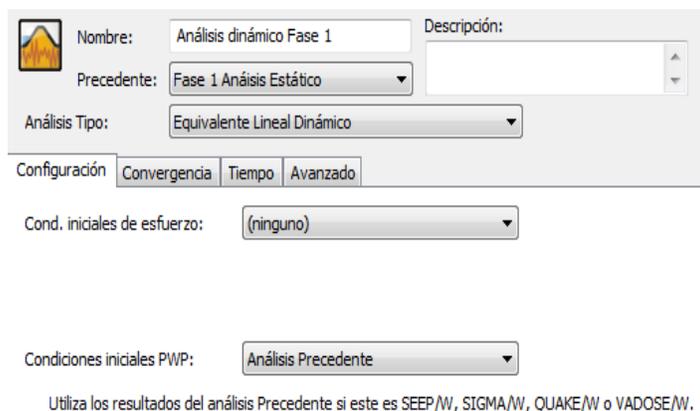


Figura 2.60.-Opciones de identificación del tipo de análisis.

En el cuadro diálogo anterior se rellena la casilla Nombre con el nombre Análisis dinámico y en la lista desplegable Precedente se escoge Análisis estático para trabajar con los resultados anteriores.

- Paso 5.2 Definir las propiedades de los suelos.

Seleccionar Materiales en el menú desplegable Introducir, como se ve en la figura 2.61:

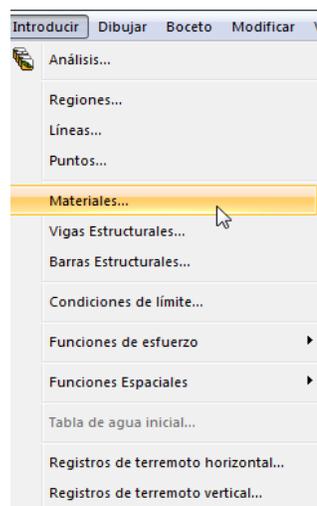


Figura 2.61.-Opción Introducir / Materiales

Una vez hecho clic aparece el siguiente cuadro de diálogo, figura 2.62:

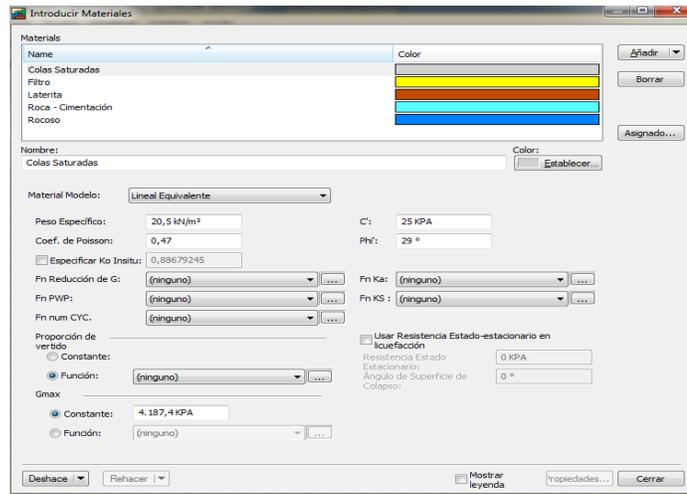


Figura 2.62.-Introducción de tipos de materiales

En el cuadro de diálogo anterior en el desplegable Material Modelo seleccionar Lineal Equivalente, ingresar los valores de peso específico, cohesión, ángulo de fricción interna, módulo de cortante y coeficiente de Poisson, de cada uno de los materiales (Tabla 2.2, Tabla 2.4).

- Paso 5.3 Asignarlas propiedades de suelos a las regiones.

Seleccionar la opción Dibujar / Materiales, como se ve en la figura 2.63:

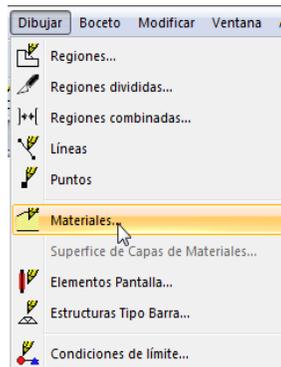


Figura 2.63.-Activación del comando de aplicación de materiales

Aparece el siguiente cuadro de diálogo, figura 2.64:

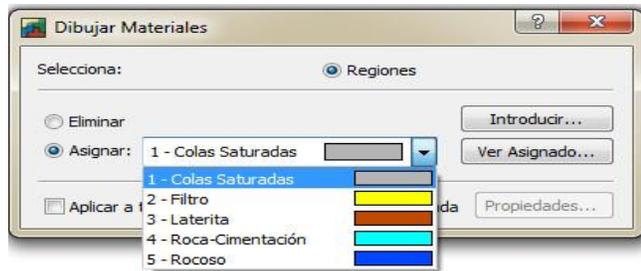


Figura 2.64.-Materiales a aplicar a las regiones definidas

En la lista desplegable se selecciona el material para aplicar, como se muestra a continuación en la figura 2.65:

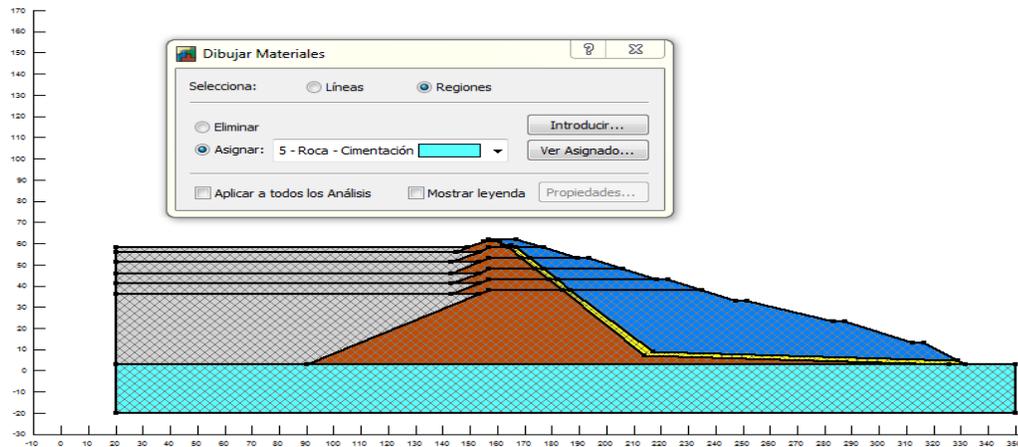


Figura 2.65.-Definición de las propiedades de las regiones

- Paso 5.4 Introducir fuerzas dinámicas (acelerogramas)

Seleccionar la opción Registro de terremoto horizontal en el menú Introducir, como se ve en la figura 2.66:

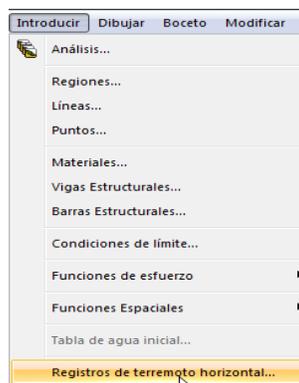


Figura 2.66.-Activación del comando de Registro de terremoto horizontal

Aparece la siguiente ventana, figura 2.67:

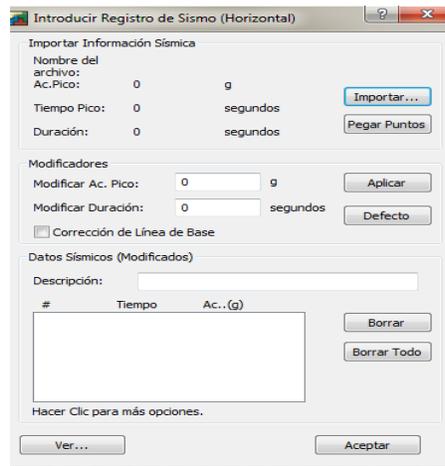


Figura 2.67.-Opción Introducir / Registro de terremoto horizontal

En la ventana anterior se pulsa la opción Importar para introducir al programa el registro sísmico. Para el caso de estudio se utilizan los registros del sismo de Altadena, debido a que su aceleración pico es similar a la zona de estudio de Moa. Se escala el acelerograma llevando exactamente a la aceleración pico de 0.227g valor correspondiente al municipio Moa, provincia Holguín (según NC 46 2017), como se muestra en figura 2.68:

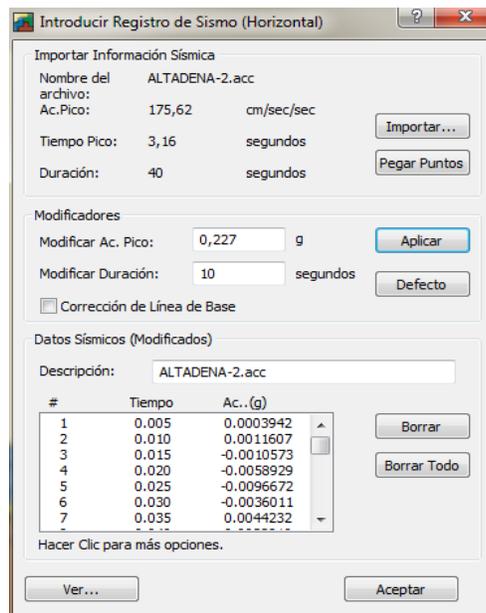


Figura 2.68.-Registro de terremoto horizontal

Al pulsar la opción Ver, aparece figura 2.69:

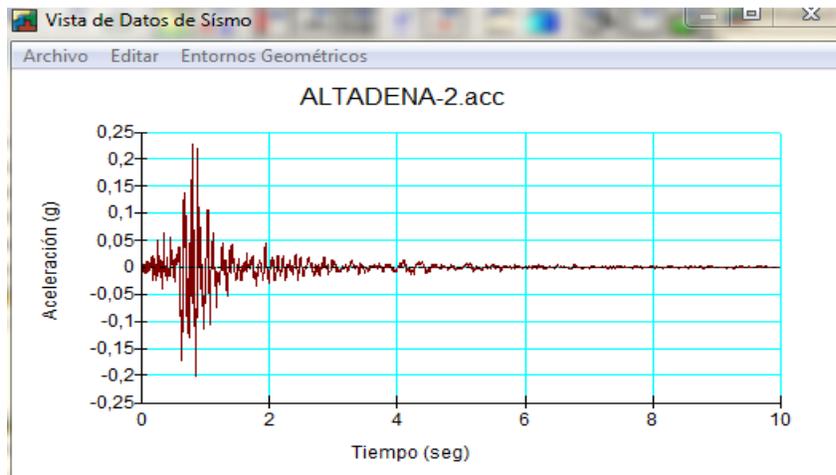


Figura 2.69.-Vista de datos del sismo

- Paso 5.5 Definir las condiciones de frontera.

Seleccionar del menú desplegable Dibujar la opción Condiciones de límite, ver figura 2.70. Aparece el cuadro dialogo donde se escoge las restricciones en el contorno de movimiento de masa en el suelo, apoyos fijos en la base (restricción x-y) y apoyo simple en los costados (restricción x) ver figura 2.71



Figura 2.70.-Opción Dibujar>Condiciones de límite.

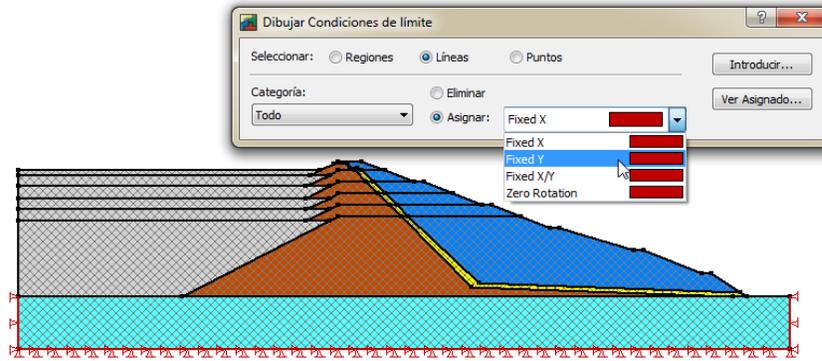


Figura 2.71.-Condiciones de límite

- Paso 5.6 Realizar los cálculos y obtener del factor de seguridad dinámico para comparar con FSDmin.

Seleccionar del menú desplegable Ventana la opción Gestor de Soluciones como se ve a continuación en la figura 2.72.

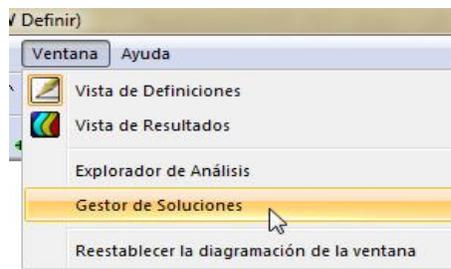


Figura 2.72.-Activación de Gestor de Soluciones

Activada esta opción sale el siguiente cuadro dialog, figura 2.73:



Figura 2.73.-Apariencia de Gestor de solución

Una vez marcada las hipótesis del Análisis dinámico Fase 6 pulsar en Inicio y si es correcto procede al cálculo. Al pulsar esta opción se obtiene la siguiente ventana de resultados como se muestra en la figura 2.74 y 2.75:

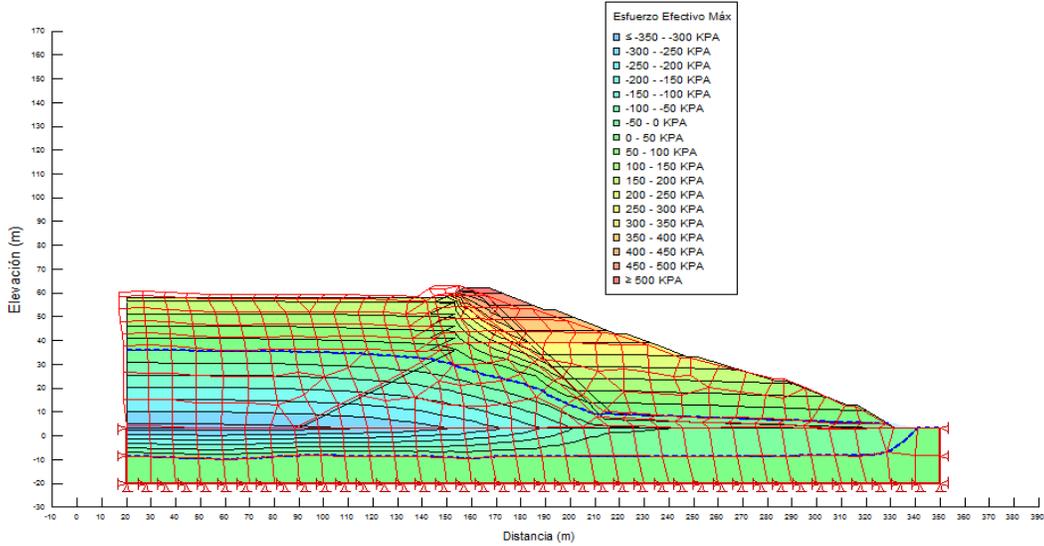


Figura 2.74.-Resultado de los cálculos realizados

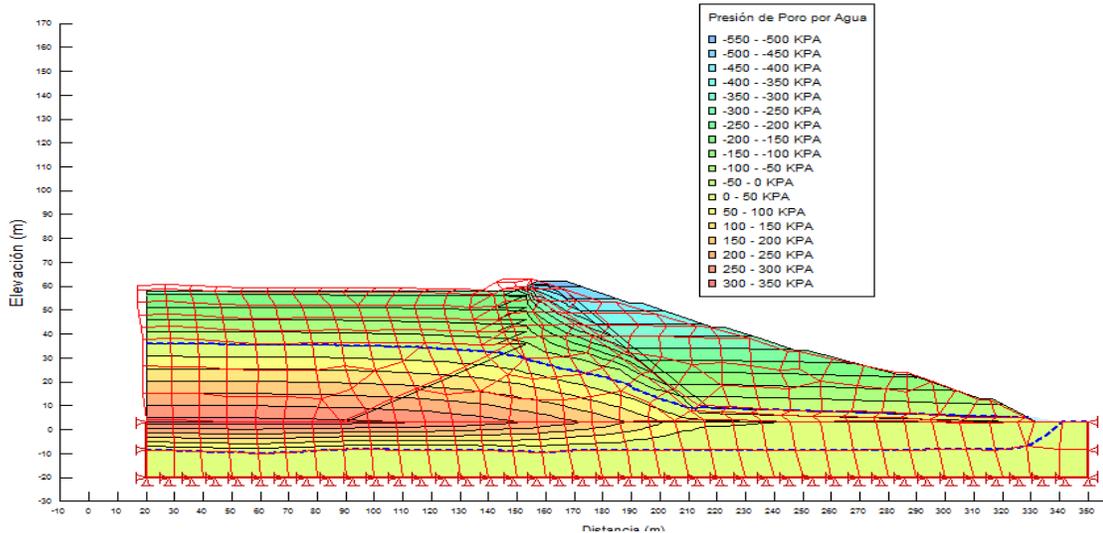


Figura 2.75.-Resultado de los cálculos realizados

Una vez terminados los cálculos se obtienen las distribuciones de esfuerzos actuantes y los excesos de presión de poro generados por el sismo. Los resultados se integran al análisis de estabilidad en Slope/W realizado anteriormente, dando como resultado los factores de seguridad dinámicos en cada una de las fases de construcción de la presa. Estos valores son comparados con $FSD_{min} \geq 1$ valor determinado en el Capítulo 1 como el límite a considerar para asegurar estabilidad de los taludes. En la tabla 2.5 se observa los resultados obtenidos del análisis.

Tabla 2.5 Variación de los factores de seguridad dinámico en cada fase.

Fases	Altura máxima (m)	FSD	FSD min
1	38	1,202	Cumple
2	43	1,358	Cumple
3	48	1,240	Cumple
4	53	1,107	Cumple
5	58	1,213	Cumple
6	62	1,199	Cumple

Se puede observar que al analizar la comparación del factor de seguridad con 1, valor establecido como límite por fase cumple la condición, por lo que la presa de cola Yagrumaje es estable ante acciones dinámica.

Conclusiones del capítulo

1. Se elabora un procedimiento para el análisis de estabilidad de taludes a través del software Geostudio 2012, el cual tiene en cuenta tres tipos de análisis, el estático a través de la herramienta Slope/W, el análisis de filtración con la herramienta Seep/W, y el análisis dinámico mediante la herramienta Quake/W con la inclusión de parámetros dinámicos y acelerogramas.
2. Se logra aplicar el procedimiento en el análisis dinámico de los taludes de la presa de cola Yagrumaje lo que permite determinar la estabilidad a través de los factores de seguridad.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Los fundamentos teóricos metodológicos permiten sustentar el análisis dinámico de taludes de presas de colas a través de los factores que inciden en la estabilidad, los métodos de análisis, los factores de seguridad establecidos para la comparación y el empleo del software Geostudio 2012.
2. El estudio detallado de las características y particularidades de la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012, posibilita elaborar el procedimiento para realizar el análisis dinámico de taludes.
3. La aplicación del procedimiento propuesto al caso de estudio presa de cola Yagrumaje, a través la herramienta Quake/W del software GeoStudio 2012 permite realizar un mejor análisis de los taludes al incluir acelerogramas y parámetros dinámicos, lo que posibilita la validación de la hipótesis de la investigación.

RECOMENDACIONES

1. Incluir en el procedimiento el estudio de las deformaciones a través del software Geostudio 2012 para el análisis de estabilidad dinámico de taludes.
2. Ofrecer los resultados de la investigación a la UIC ENIA Holguín para su utilización.
3. Incorporar el procedimiento propuesto como material docente en la asignatura Geotecnia en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Holguín.

BIBLIOGRAFÍA

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., Boyce, G.M. (1996) "Slope stability and stabilization methods". Wiley-Interscience, 629 p
- Actis, Raúl Alberto. (2000) "Diques de Colas Mineras. Calculo, Diseño, Construcción y Operación." Editado en el marco del convenio entre la Dirección Nacional de Minería y la Fundación Empremin. Bolivia.
- Arango Arias, E. D. (2017) "Estudio de la sismicidad de la localidad de Moa para la construcción de puente de empresa del níquel Pedro Sotto Alba-Moa Niquel S.A."
- Arango, E. D., Vega, N., Ríos, Y., Escobar, E., Reyes, Z. (2008) "Potencialidades sismo generadoras de la región noreste de la provincia Holguín", Monografía científica inédita, Fondos del CENAI. Santiago de Cuba.
- Armas Novoa, R. y Horta Mestas, E. (1987). "Presas de Tierras". Editorial ISPJAE, La Habana.
- Barrera, V. S, y Campaña, Z. J. (2015) "Análisis de estabilidad de presas de relave-práctica chilena".
- Norma Cubana 46:2017
- Bojorque Iñiguez. J (2011) "Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes"
- Botero, E, Flores-Berrones R, Romo M P, Méndez B. (2011) "Nuevo método de diseño sísmico para cortinas de tierra y enrocamiento y taludes". Tecnología Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México, vol. II, núm. 3, julio - septiembre de 2011, pp. 177-200
- Colectivo de autores (2016) "Reporte de investigación evaluación del peligro sísmico del área de ubicación de la empresa Moa Nickel SA". Fondos del IGP, CENAI y GEOCUBA.

- ENIA. (2013) “Resultados de los trabajos geofísicos de ingeniería sísmica y tomografía eléctrica en presa de cola de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara”.
- Federal Guidelines for Dam Safety (2005) “Earthquake Analyses and Design of Dams”.
- González Vallejo, L, Ferrer M, Ortuño L, Oteo C, (2002), “Ingeniería Geológica”, Capítulo 11, p 542
- Guía Ambiental de Presas de Colas, (2001) Ministerio de Desarrollo Económico, Viceministerio de Minería y Metalurgia Unidad Sectorial de Medio Ambiente Bolivia.
- Hernández Columbié, T (2015) “Sistema de gestión de riesgos por fallo en la presa comandante Pedro Soto Alba”. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológica
- Hernández, C. T., Lacaba, G. R. (2013) “Caracterización geotécnica de los suelos de las presas de relaves mineros – práctica cubana de en la industria del níquel. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa”.
- ICOLD, Bulletin 97 (1995) “Tailings Dams Designs of drainage. Review and recommendations”. International Commission on Large Dams, Paris.
- Lara Montani, J.L. (1999) “Experiencias de operación y monitoreo de diques resistentes de arena de relaves en la estabilidad de depósitos de relaves”.
- Noas. J. L., Vega. G. N, Ríos. M. Y., Chuy. R. T. (2016) “Reporte de investigación, evaluación del peligro sísmico del área de ubicación de la empresa Moa Níquel SA” CENAI - CITMA
- Rodríguez Infante, A. (1998) “Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgo de génesis tectónica”. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológica
- Sanhueza Plaza, C., Rodríguez Cifuentes, L. (2013) “Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas natural”

US Corps of Engineers (1970) "Engineering and design – stability of earth and rock fill dams", Engr. Manual EM 1110-2-1902, Dept. of the Army, Corp of Engrs., Office of the Chief of Engineers.

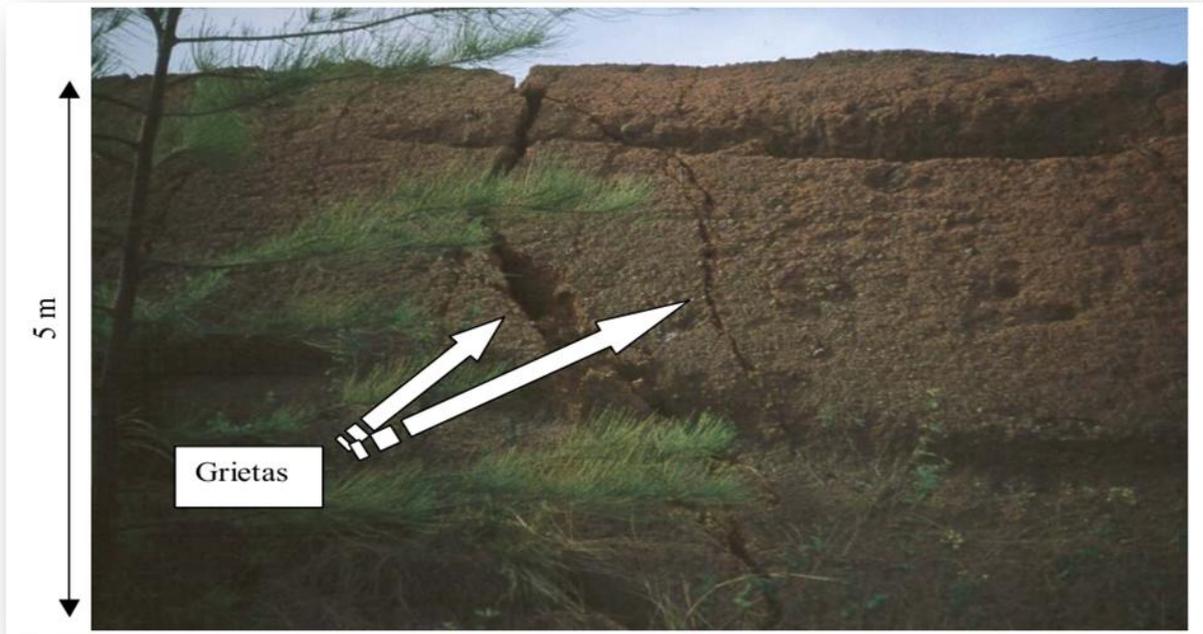
Vega N., Arango E. D., Ríos Y., Núñez A., Pérez C., Núñez K., Zapata J. A., Rueda J. (2013) "Valoración de la sismicidad ocurrida en los alrededores de la presa Nuevo Mundo en el municipio Moa". Anuario de la Sociedad Cubana de Geología, No. 1: 137-143.

Venegas Conrado, F. (2011). "Respuesta sísmica reciente en balsas de relaves chilenas y presas de material suelto". Tesis de Maestría.

Zapata. J. A., Chuy. T., Cutie. M., Montenegro. C., Marisy. J. (2006). Investigaciones sismológicas para las obras de ampliación de la fábrica Moa Nickel S.A. "Pedro Sotto Alba" de Moa. Holguín. Informe Científico – Técnico. Fondos del CENAI. 96 pp.

ANEXOS

Anexo 1: Balsa de residuo inactiva construida por la empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa.



Fuente: Rodríguez (2002)

Anexo 2: Puntos de contorno presa de cola Yagrumaje municipio Moa, provincia Holguín

Puntos	X (m)	Y (m)
Punto 1	90	3
Punto 2	331,7	3
Punto 3	329	5
Punto 4	316,5	13
Punto 5	312,5	13

Punto 6	287,5	23
Punto 7	283,5	23
Punto 8	251,5	33
Punto 9	247,5	33
Punto 10	235	38
Punto 11	157	38
Punto 12	187	38
Punto 13	217	9
Punto 14	20	3
Punto 15	20	36
Punto 16	184	38
Punto 17	214	7
Punto 18	325,7	3
Punto 19	153	36
Punto 20	222,5	43
Punto 21	218,5	43
Punto 22	182	43
Punto 23	179	43
Punto 24	157	43
Punto 25	143	36
Punto 26	153	41
Punto 27	20	41
Punto 28	206	48

Punto 29	177	48
Punto 30	174	48
Punto 31	157	48
Punto 32	143	41
Punto 33	153	46
Punto 34	20	46
Punto 35	193,5	53
Punto 36	189,5	53
Punto 37	172	53
Punto 38	169	53
Punto 39	157	53
Punto 40	143	46
Punto 41	153	51
Punto 42	20	51
Punto 43	177	58
Punto 44	167	58
Punto 45	164	58
Punto 46	157	58
Punto 47	143	51
Punto 48	153	56
Punto 49	20	56
Punto 50	167	62
Punto 51	165	59

Punto 52	162	59
Punto 53	157	62
Punto 54	145	56
Punto 55	155	61
Punto 56	20	58
Punto 57	161	61
Punto 58	149	58
Punto 59	20	-20
Punto 60	350	-20
Punto 61	350	3

Fuente: Vázquez (2017).

Anexo 3: Regiones de la presa de cola Yagrumaje municipio Moa, provincia Holguín

Regiones	Puntos	Área (m ²)	Material
Región 1	59;60;61;2;18;1;14	7.590	Roca-Cimentación
Región 2	3;4;5;6;7;8;9;10;12;13	2.513,3	Rocoso
Región 3	3;2;18;17;16;12;13	362,3	Filtro
Región 4	18;1;19;11;16;17	2.928,9	Laterita
Región 5	1;14;15;25;19	3.349,5	Colas Saturadas
Región 6	10;20;21;22;12	221,25	Rocoso
Región 7	12;22;23;16	15	Filtro
Región 8	16;23;24;26;25;19;11	167,5	Laterita
Región 9	21;28;29;22	163,75	Rocoso
Región 10	22;23;30;29	15	Filtro

Región 11	23;24;26;32;33;31;30	142,5	Laterita
Región 12	25;15;27;32;26	640	Colas Saturadas
Región 13	27;32;33;40;34	640	Colas Saturadas
Región 14	28;35;36;37;29	126,25	Rocoso
Región 15	29;30;38;37	15	Filtro
Región 16	30;38;39;41;40;33;31	117,5	Laterita
Región 17	41;47;42;34;40	640	Colas Saturadas
Región 18	36;43;44;37	68,75	Rocoso
Región 19	37;44;45;38	15	Filtro
Región 20	38;45;46;48;47;41;39	92,5	Laterita
Región 21	47;42;49;54;48	640	Colas Saturadas
Región 22	44;51;52;45	3	Filtro
Región 23	45;52;57;55;58;54;48;46	46	Laterita
Región 24	43;50;53;55;57;52;51;44	43	Rocoso
Región 25	56;49;54;58	254	Colas Saturadas

Fuente: Vázquez (2017)

